

TREBALL FI DE CARRERA

Títol

**Influència de la persistència de les juntes en la magnitud de
despreniments rocosos. Aplicació del *Laser Scanner* Terrestre.**

Autora

Dulcis Santana i Roma

Tutor

Jordi Corominas Dulcet

Departament

Enginyeria del terreny, cartogràfica i geofísica

Intensificació

Enginyeria Geològica

Data

23 d'octubre de 2009

AGRAÏMENTS

Aquest estudi s'ha pogut realitzar gràcies a la financiació parcial del projecte MEC "DALMASA" i "MODEVALL" projecte CGL 2005-05282.

Aprofito per a expressar el meu agraïment a Olga Malvrouli, Marta Guinau i David Garcia per el seu suport i ajuda en l'elaboració del treball de camp i tractament de dades. I al meu tutor, Jordi Corominas, la dedicació i coneixements brindats.

ÍNDEX

1.INTRODUCCIÓ	1
1. 1. DEFINICIÓ I CARACTERITZACIÓ DELS DESPRENIMENTS ROCOSOS	1
1. 2. ELS DESPRENIMENTS COM A RISC GEOLÒGIC	4
1. 3. MÈTODES D'ANÀLISI DE LA SUSCEPTIBILITAT I LA PERILLOSITAT DELS MOVIMENTS DE VESSANT.	5
1.4. TREBALLS ANTECEDENTS	7
1.5. OBJECTIUS I MOTIVACIÓ	9
1.6. MARC SOCIOGEOGRÀFIC	10
1.7. MARC GEOLÒGIC	11
1.7.1. LITOLOGIA	11
1.7.2. HISTÒRIA GEOLÒGICA I TECTÒNICA DE LA SERRALADA PIRINENCA	12
1.7.3. EL BATÒLIT DE MONTLLUÍS-ANDORRA, FASES DE DEFORMACIÓ	14
1.7.4. GEOMORFOLOGIA	18
2. TREBALLS REALITZATS	20
2.1.RECULL SISTEMÀTIC DE DADES SOBRE LES DISCONTINUÏTATS	20
2.2. ANÀLISI ESTRUCTURAL	21
2.3. MÈTODE DE RECONeixEMENT MITJANÇANT EL LASERSCANNER TERRESTRE (TLS)	22
3. METODOLOGIA	25
3.1 MÈTODE DE CAMP: ESTIMACIÓ DE L'ESPAIAT I LLARGÀRIA DE LES DISCONTINUÏTATS UTILITZANT RECONeixEMENTS TIPUS <i>SCANLINE</i>	25
3.2 MÈTODE SEMIAUTOMÀTIC: EL LASERSCANNER TERRESTRE (TLS)	30
3.2.1 TRACTAMENT DE DADES	30
3.2.2 CÀLCUL D'ÀREES	37
4.RESULTATS	41
4.1. RESULTATS DEL TREBALL DE CAMP	41
4.1.1 CARACTERITZACIÓ DE LES FAMÍLIES DIFERENCIADES AL CAMP	44

4.1.2 RELACIONS ESTRUCTURALS	48
4.2 ANÀLISI DE LES DADES GENERADES PER EL LASERSCANNER	50
4.3 CONSIDERACIONS FINALS	64
4.3.1 RELACIÓ DE LA CONTINUÏTAT DE LES JUNTES EN LA MAGNITUD DELS DESPRENIMENTS I LLISCAMENTS ROCOSOS	64
4.3.2 PRESICIÓ EN LA DETERMINACIÓ DE LES DIFERENTS FAMÍLIES I DEL CÀLCUL D'ÀREES A PARTIR DE LA METODOLOGIA UTILITZADA	65
5. CONCLUSSIONS	69
BIBLIOGRAFIA	
ANNEX I ALS RESULTATS: DISTRIBUCIÓ D'ÀREES PER A CADA FAMÍLIA SEGONS SECTORS	
ANNEX II ALS RESULTATS: DISTRIBUCIÓ ACUMULADA DE LA FREQUÈNCIA DE VALORS DE LES ÀREES PER A CADA FAMÍLIA QUE PRESENTA RUPTURA PLANAR EN CADA UN DELS SECTORS	

ABSTRACT

Mountain areas become very often, places for mass movements, due to their hillslope instability. On the other hand, increasing populations on mountain areas leads to the increase of the exposed elements to these phenomena and of the consequent risk for people and properties every year.

Therefore we need to evaluate the actual geological risk in order to manage land occupation properly and to take measures to ensure that we can minimize that risk.

Hazard quantitative evaluation, due to rockfalls, requires a deep knowledge of relationship between magnitude and frequency. Here, we understand by magnitude, the mobilized rock mass. Several authors found out that the relationship between magnitude and frequency follows a potential law (Hung et al., 1999; Rousseau, 1999; Dussauge et al., 2001)

The present dissertation aims to evaluate TLS (Terrestrial Laser Scan) usefulness on finding out magnitude/frequency relationship in rockfall study.

In order to achieve this objective, we chose as a pilot zone a seriously affected by rockfalls area at Solà de Sta. Coloma in Andorra.

Individuation of rock masses which are mobilized and moving downwards along slopes on a rock mass is related to cracks and joints. Generally these joints result from particular tectonic phases and stress history. Those discontinuities present in many rock massifs may be grouped into different families according to dip directions and dips displayed.

Our work scheme lies on obtaining point clouds from topographical surface through TSL and processing them to get for each case, points belonging to rock surface, points belonging to the same plane and their plane areas.

Planes identified by TLS had been verified starting from outcrops measurements, by compass on the field where those discontinuities emerge. We have verified that all seven families identified by TLS are the same as those measured with hand measurement procedure.

Accumulated Area-Frequency relationships have been put up. Even though plane area is not a direct measurement of block mass laying on it, we have verified that the b exponent from relationship area-accumulate frequency, fitting into a function which can be defined as $\text{Frequency} = D \cdot (\text{area})^{-b}$, is in general greater than those obtained in most of previous works, in spite of the fact that it coincides with some of those results.

It has also been noticed that instable plane areas are relatively small, most of them minor to 100 m². We carried out a structural analysis in order to determine the interaction relationship in-between plane families. It is considered that the reduced dimension of the planes is due to formerly generated fault families which are systemically cut by later formed ones, while in joints without relative displacement, the argument would be the other way round: When those are developed they will not progress through former discontinuities. In this way, we can confirm the fact that there is an up-limit in great size rockfalls formation.

Geological hazard assessment of rockfalls means a complete knowledge of their magnitude and frequency.

This dissertation tries to develop two complementary methods, analyzing several joint aspects.

Field method measures systematically every discontinuity or joint from the rock massif, especially devoted to determine discontinuity spacing and discontinuity length or persistence. We also use a field method to study structure and time relations in order to connect them with discontinuity length or persistence, taking into account two aspects: on the one hand, the possibility that a fault family displace those previously present on the massif. Later faults will suppose a systematic disturbance for persistence of previous ones.

This field method will be used to check all acquired data already obtained by a lasses scanner, - the second method used in this dissertation - through which we can analyze slope surface starting from a data processing directed to differentiate from rock massif, those surfaces concerning to different discontinuities.

Differentiated surfaces can be considered as a mould limiting sizes of rockfall volume. Area calculation of surfaces belonging to various discontinuities allows us to analyze statistically and to know distribution and frequency of occurrence of these phenomena.

Hillside Azimuth position and slope determine those discontinuities in most instable disposition. We analyze on each hillside, those discontinuity families which may generate landslides. The larger the areas are, depending on the discontinuity families which can be able to generate landslides, the bigger will be magnitude of rockfalls. Therefore, there can be established a relationship between magnitude and frequency of rocky landslides for each sector.

Applying Actualism principle, the determination of natural processes which happened in the past is the clue to know present processes, we can use these data to foresay magnitude and frequency of future landslides.

Obtained relationship between magnitude and cumulative frequency expresses law with an adopted form already posed by several authors in recent publications (Hungr et al. 1999; Rousseau, 1999; Dussauge et al. 2001).

Our research has been carried out, and achieved at Solà de Sta. Coloma, at Andorra (Central Pyrenees). In the studied area, we see granodiorites emerge, which are meaningfully broken up and present active rockfall dynamics, and which offers an adequate area for the investigation of rockfalls.

The present dissertation aims to be a new contribution to the knowledge of the relationship between rockfall magnitude and frequency. Up till now, it has been difficult to establish this relationship, because of lack of enough data about previous rockfalls that would allow us to make a quantitative risk analysis. With our study, we provided new data besides those produced in previous years and for this reason our knowledge has progressed and can be used for eventual mitigation solutions.

RESUM

Les zones muntanyoses són molt sovint escenaris de moviments de massa fruit de desequilibris als seus vessants. D'altra banda, el creixement de poblacions en zones muntanyoses comporta un augment de l'exposició a aquests fenòmens, interacció que genera anualment nombroses víctimes i danys materials.

En aquestes zones és necessari avaluar el risc geològic existent per a gestionar correctament l'ocupació del territori i aplicar-hi les mesures adients per a minimitzar-lo.

L'avaluació quantitativa del perill per despreniments requereix el coneixement de la relació entre la magnitud i la freqüència. Aquí magnitud s'entén com volum rocós mobilitzat. Diversos autors han trobat que la relació magnitud-freqüència segueix una llei potencial (Hungr et al., 1999; Rousseau, 1999; Dussauge et al., 2001).

Aquesta tesina té com objectiu avaluar la possibilitat d'obtenir una relació magnitud-freqüència dels despreniments amb l'ajut d'un TLS (Terrestrial Laser Scanner).

Per a fer-ho, s'ha triat l'escenari pilot una zona afectada per despreniments al Solà de Santa Coloma, Andorra.

La individualització de volums de roca que es mobilitzen pendent avall en un massís rocós està determinada per la predisposició de fractures. Generalment, aquestes fractures són una resposta a una història tensional determinada i en molts massissos rocosos les discontinuïtats presents es poden agrupar en diferents famílies segons les orientacions i cabussaments que presenten.

El pla de treball ha consistit en l'obtenció de núvols de punts de la superfície topogràfica mitjançant el TLS i el seu tractament per a aconseguir respectivament, els punts pertanyents a la superfície rocosa, els punts pertanyents a un mateix pla i les àrees d'aquests plans.

Els plans identificats amb el TLS s'han comprovat a partir de mesures d'afloraments amb brúixola sobre el terreny d'aquelles discontinuïtats que hi afloren. S'ha comprovat que les 7 famílies identificades amb el TLS son les mateixes que les mesurades amb el procediment de mesura manual (brúixola i clinòmetre).

S'han construït les relacions Àrea- Freqüència acumulada. Encara que l'àrea dels plans no és una mesura directa del volum de bloc que reposa sobre aquesta, s'ha comprovat que l'exponent b de la relació Àrea - Freqüència acumulada, que s'ajusta a una funció que es pot escriure com $\text{Freqüència} = D \cdot (\text{àrea})^{-b}$, és sensiblement major que en la majoria dels treballs anteriors, tot i que coincideix amb algun d'aquests resultats.

S'ha observat també que les àrees dels plans inestables son relativament petites, en general menors a 100 m^2 . S'ha realitzat un anàlisi estructural al camp amb la finalitat d'extreure les relacions d'interacció entre les famílies de plans, es creu que aquesta dimensió reduïda de les àrees és deguda a que les famílies de falles que s'han generat amb anterioritat queden sistemàticament tallades per les formades posteriorment, mentre que en el cas de diàclasi el raonament és l'invers: aquestes, al formar-se, no progressaran a través de discontinuïtats anteriors. D'aquesta manera es confirma el fet que existeix un límit superior en la formació de desprendiments rocosos de grans dimensions.

1.INTRODUCCIÓ

Aquesta tesina s'engloba dins de l'estudi dels riscos naturals, més concretament, el risc de despreniments rocosos.

A continuació es presenta una breu introducció als despreniments i al perill que comporten, tot definint aquells conceptes que s'hi relacionen. Es descriuen els termes i els mètodes utilitzats fins ara per a avaluar-los i s'introdueix a la metodologia proposada per al coneixement de la relació entre magnitud i freqüència de caiguda de blocs rocosos a partir de l'estudi de les dimensions de les àrees corresponents a les diverses famílies de discontinuïtats del massís rocós, dos factors imprescindibles per a avaluar el risc de despreniments. Finalment es farà una descripció del marc sociogeogràfic i geològic on s'ha desenvolupat aquest estudi, al Solà de Santa Coloma, Andorra.

1.1. DEFINICIÓ I CARACTERITZACIÓ DELS DESPRENIMENTS ROCOSOS

Els despreniments son masses rocoses que queden individualitzades i cauen lliurement sota l'acció de la gravetat. El mecanisme de mobilització pot ser molt variable (figura 1), però en qualsevol cas, la propagació és essencialment per caiguda lliure, rebots i rodolament pendent avall, sense que comporti un lliscament del conjunt rocós individualitzat per cap superfície predeterminada.

El terme lliscament es refereix a tot moviment de massa rocosa que se separa de la resta de massís rocós de forma més o menys solidaria a favor d'una o varies superfícies de ruptura predeterminades. Si només hi intervé una superfície, el lliscament s'anomenarà lliscament de ruptura planar. Si ho fa a partir de dues o més superfícies, s'anomena lliscament de ruptura en tascó.

Quan un bloc o conjunt de blocs es desplomen amb un moviment rotacional cap al vessant, es parla de ruptura per bolcada.

Els moviments de vessant en un massís rocós poden involucrar un o altre fenomen o bé la combinació d'aquests.

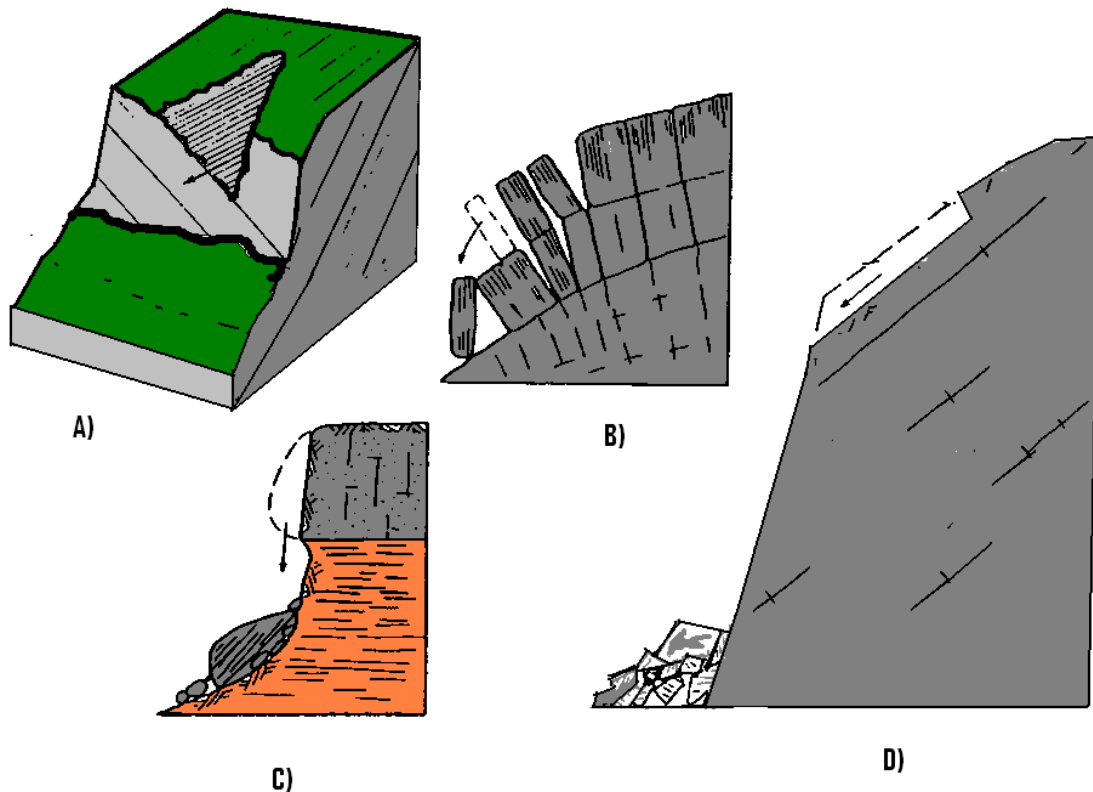


Figura 1. Diferents tipus de trencada que propicien els desprendiments i lliscaments rocosos: A) En tascó, B) Per bolcada, C) Erosió diferencial o soscavació, D) Ruptura de tipus planar.

Els factors que propicien els lliscaments i els desprendiments poden ser intrínsecs del massís rocós influenciant-hi la disposició i geometria dels plans de discontinuïtat i l'orientació i pendent del vessant.

El lloc de partida dels desprendiments (Figura 2), zona de sortida, és una zona que esdevé inestable a causa de la presència de discontinuïtats disposades de forma desfavorable, que originen els mecanismes de mobilització esmentats, com a conseqüència, els blocs cauen i van impactant i/o fragmentant-se i/o rodolant pendent avall, recorrent el que s'anomena zona de trajecte, on l'energia potencial és transformada en energia cinètica i energia perduda per fragmentació i deformació, fins que els blocs recuperen una posició estable a la zona d'arribada, que normalment és una zona més planera i obstaculitzada a causa de l'acumulació de blocs de desprendiments anteriors. Sovint la zona de trajecte i arribada no tenen un límit definit.

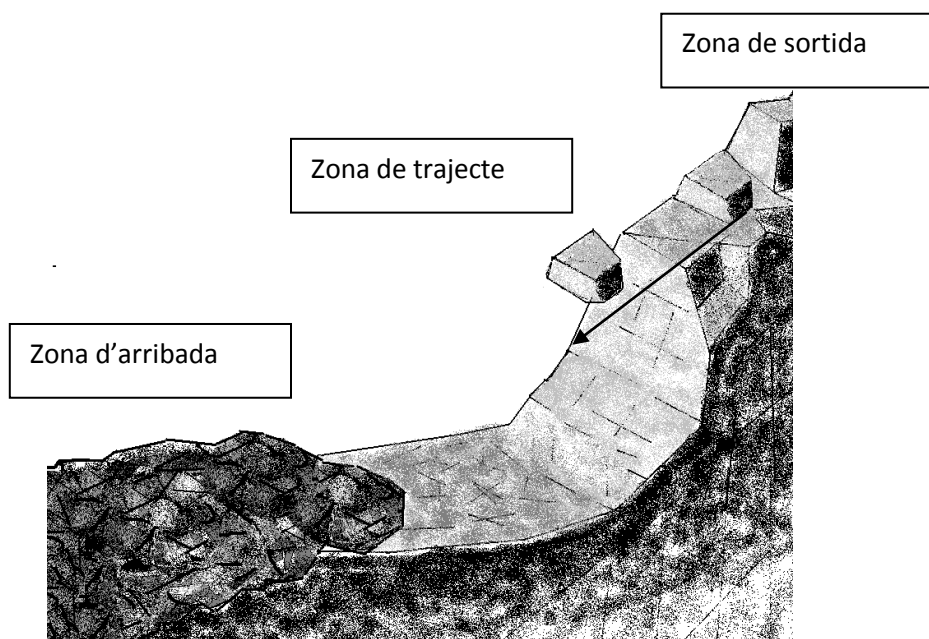


Figura 2. Diferenciació de les zones involucrades en un despeniment.

La zona de sortida, en la qual se centra aquest estudi, es caracteritza per presentar indicis de la presència d'una massa rocosa individualitzada i mobilitzada. La distribució d'aquestes, generalment, està condicionada per la distribució dels plans de discontinuïtat al massís rocós. La caracterització de les zones de sortida pot aportar indicis dels mecanismes de mobilització (lliscaments i ruptures en tacó o planars, bolcades...) i de la grandària de les masses susceptibles de ser mobilitzades. Un cop la massa rocosa es mou a través de la zona de trajecte, sense lliscar per cap superfície predeterminada, es parla de despeniment rocós.

Els despeniments rocosos es poden classificar amb una gran varietat de criteris genètics o descriptius (Whalley, 1984; Flageollet i Weber, 1996), segons la naturalesa del material esllavissat, la rapidesa del moviment, forma de la trencada, dimensions... (Varnes, 1978) o en el volum després (Walley, 1984; Lateltin, 1987; Rouiller et al., 1998). La probabilitat de manifestació d'un despeniment està estretament lligada al seu volum (Whalley, 1984). El volum d'un esdeveniment influirà en aquesta magnitud i alhora, la freqüència d'un esdeveniment depèn també de la magnitud. Conèixer la magnitud i freqüència dels despeniments és essencial per a l'anàlisi quantitativa del risc.

1.2 ELS DESPRENIMENTS COM A RISC GEOLÒGIC

El risc geològic forma part del conjunt de riscos naturals, segons la classificació d'Ayala-Carcedo (1987), que divideix els riscos en tecnològics o humans (associats a errades humanes o de sistemes tecnològics com podrien ser nuclears, trencament de preses o estructures, vessaments...), els riscos globals (relatius als desequilibris a escala planetària de grans cicles com l'hidrològic, biogeoquímics...), els riscos naturals (Provocats per fenòmens naturals) i els mixtes (associats a causes incloses en més d'un dels anteriors grups).

El risc natural és la possibilitat que un territori i la societat que l'habita pugui veure's afectat per un fenomen natural de rang extraordinari causant, de menors a majors conseqüències danys, catàstrofes o desastres naturals.

Els riscos naturals es divideixen entre els biològics (plagues, epidèmies) i els físics, dels quals formen part els geològics, climàtics (relatius a processos atmosfèrics), geoclimàtics (interacció entre fenòmens geològics i climàtics) i els còsmics (processos de l'espai que afecten a la terra). El risc de desprendiments tractat en aquesta tesina és un risc natural de tipus geològic: *contingència desfavorable de caire geològic a la qual son exposats els éssers vius, especialment l'home i tota la natura*. (Diccionari de Geologia, Enciclopèdia Catalana de l'Institut d'Estudis Catalans).

Els riscos naturals, s'avaluen a partir de la integració de la perillositat natural, la vulnerabilitat de l'element a protegir i del nombre d'elements exposats (Varnes 1984, Panizza, 1987, Ayala-Carcedo, 2002). A continuació es defineixen aquests factors de risc:

- **Vulnerabilitat:** És el grau de pèrdues de vides humanes o bens causat per un determinat succés respecte al total exposat.
- **Perillositat:** és la probabilitat que es produeixi un succés amb una intensitat determinada en un interval de temps i espai determinats. Dependrà de la distribució geogràfica del succés i la freqüència amb la que es repeteix un fenomen d'una magnitud determinada.

Per al càlcul quantitatiu del risc caldrà fer el producte de la perillositat per la vulnerabilitat mesurat generalment en euros per any. De forma esquemàtica, el risc es pot expressar amb la següent fórmula:

$$R = \sum P \sum V \cdot c$$

On R és el risc, P la perillositat, V la vulnerabilitat i c el valor o cost dels bens vulnerables. El producte parcial de $V \cdot c$ es denomina risc específic (Varnes, 1984) i representa el càlcul de les conseqüències d'un fenomen d'una determinada perillositat. Per a cada probabilitat d'ocurrència en tindrem un valor, i teòricament el resultat serà una corba que recull tots els fenòmens possibles segons la seva probabilitat d'ocurrència i les conseqüents pèrdues.

Determinar el risc total implica conèixer la probabilitat tant espacial com temporal amb que es dona un fenomen d'una perillositat determinada.

En l'estudi dels moviments de vessant, s'han desenvolupat diversos mètodes centrats l'estudi dels factors de risc com ara la susceptibilitat o bé la perillositat. Per a la primera serà necessari conèixer una distribució espacial de moviments ja succeïts, o bé d'indicadors d'inestabilitat, i per a l'estudi de la perillositat és necessària, a més d'una zonificació espacial, una determinació de la freqüència en funció de la magnitud amb la que es donen aquests fenòmens.

1.3 MÈTODES D'ANÀLISI DE LA SUSCEPTIBILITAT I LA PERILLOSITAT DELS MOVIMENTS DE VESSANT.

Partint d'un extens recull bibliogràfic, Soeters i Van Western (1996) classifiquen els mètodes d'anàlisi en quatre tipus: el mètode heurístic, el mètode estadístic, el mètode determinista i l'inventari de fenòmens.

Els **mètodes heurístics o d'avaluació**, que poden ser **directes**, basats en l'experiència d'experts, son de caire qualitatiu i es determinen a partir del reconeixement de camp i cartografia geomorfològica, o **indirectes**, on la qualitat també estarà condicionada per l'experiència i criteris professionals i es fa a partir de fer un inventari de factors condicionants i desencadenants, exposats i diferenciats en mapes amb una ponderació segons la seva rellevància, establerta de forma objectiva.

Els **mètodes estadístics** o empírics analitzen la perillositat dels moviments de vessant mitjançant càlculs estadístics dels factors que han contribuït al desencadenament en escenaris pilot (Soeters i Van Westen, 1996). S'apliquen les mateixes anàlisis en regions similars externes als escenaris pilot i es comprova que el resultat és congruent amb els fenòmens anteriors existents. Els mateixos autors defineixen dos tipus de mètodes estadístics: Els bivariants i els multivariants.

Les anàlisis estadístiques bivariants més utilitzades són la relació entre dos aspectes relacionats amb el comportament dels moviments de vessant en múltiples escenaris, amb l'objectiu de conèixer el comportament en un escenari particular. Un exemple és la relació entre el desencadenament d'esllavissades i la precipitació. (Caine, 1980; Corominas i Moya, 1999; Hurlimann et al., 2003).

L'anàlisi estadística multivariant té en compte, de manera conjunta, diversos factors que contribueixen de forma particular al desencadenament dels moviments de vessant. Els factors s'acostumen a escollir de forma sistemàtica, fet que comporta la generació d'una gran quantitat de dades. La contribució de cada factor a la inestabilitat s'obté a partir de la seva relació amb el mapa d'inventari de fenòmens. Així s'obté una matriu de dades a partir de la qual es fan càlculs estadístics complexos (Carrara, 1983; Chung i Fabri, 1995). El resultat són uns mapes de susceptibilitat per a un determinat tipus de fenomen (Baeza i Corominas 2001; Guzzetti et al., 1999; Santacana et al., 2001).

Els **mètodes deterministes** consisteixen en l'aplicació de càlculs numèrics per tal de determinar la susceptibilitat i els aspectes lligats amb la perillositat. Un exemple és el mètode d'equilibri dinàmic (Giani, 1992) o de simulació de caigudes de blocs (Descoeurdes i Zimmermann, 1987; Lopez Carreras et al., 1988; Kummacher i Keusen, 1996).

L'inventari de fenòmens és una distribució areal en un mapa dels moviments de vessant anteriors. Existeixen diversos treballs que fan un anàlisi de la perillositat mitjançant un inventari de fenòmens (Rouiller et al, 1998; Parise i Wasowski, 1999; Vilaplana et al., 2002; Pallàs et al., 2004).

Davant la necessitat creixent d'una avaluació del risc que permeti comparar entre si diversos riscos i regions amb uns criteris, terminologia, metodologies i quantificació d'ús comú a nivell internacional, recentment el JTC-1 (*Joint International Societies Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes*) i el AGS (*Australian Geomechanics Society*) desenvolupen unes pautes, definicions i terminologia a utilitzar per a un anàlisi del risc amb aquesta finalitat.

1.4.TREBALLS ANTECEDENTS

S'han realitzat nombrosos treballs amb la finalitat d'analitzar les zones exposades a moviments de vessant al Solà d'Andorra.

Un mètode utilitzat és el model Eurobloc (Copons et al., 2001), que es basa en el desenvolupament de models de propagació de caigudes de blocs per a determinar-ne les trajectòries, energies i salts que produeixen els blocs rocosos al llarg del seu descens pel vessant.

Un altre estudi portat a terme és l'anàlisi i cartografia dels blocs rocosos dels dipòsits generats per aquests moviments. La classificació dels blocs rocosos segons el volum aporta dades dels dipòsits que es formen a partir de desprendiments que desmantellen el vessant rocós (Evans i Hungr, 1993, Jomelli i Francou, 2000, Copons 1997), de la freqüència amb que es donen determinades magnituds i de la susceptibilitat a l'abast. L'abast dels blocs rocosos depèn, bàsicament, del volum de bloc i del volum del desprendiment en conjunt. D'aquesta forma, els blocs majors es trobaran més allunyats i els menors, més propers a la zona de sortida. (Evans i Hungr, 1993). Segons aquest aspecte, es diferencien tres tipus bàsics de tarteres: les tarteres amb blocs classificats segons la mida de blocs rocosos, que corresponen a desprendiments inferiors a 1000 m^3 o bé allaus rocalloses amb volums compresos entre 10^5 i 10^6 m^3 i les tarteres sense classificació de blocs, que s'han format bàsicament a partir de desprendiments de plaques rocoses o d'allaus rocalloses i suposen un volum de 10^3 - 10^5 m^3 (Copons, 2007).

Un altre mètode, aplicat també al Solà d'Andorra la vella, és l'aplicació de la dendrocronologia per al càlcul de la freqüència de moviments de massa. Tracta de recollir mostres radials dels troncs dels arbres i comptabilitzar els indicis d'impactes, situant-los espacial i temporalment. És un mètode que ha estat eficaç per la reconstrucció de l'activitat temporal de diferents tipus d'esllavissades (Shroder.,

1978; Hupp et al., 1987; Braam et al., 1987; Moya i Corominas, 1986; Corominas i Moya, 1999; Fantucci i Sorriso-Valvo, 1999). I s'ha aplicat també en el càlcul de la freqüència de desprendiments rocosos (Moya i Corominas, 2004; Pérez Arcas, 2005).

El recull de dades desenvolupat fins ara per tal de determinar la freqüència del fenomen de desprendiments presenta certes limitacions. La investigació referent als fenòmens precedents i la seva magnitud està supeditada a la presència d'indicadors que ho puguin testificar, aquests indicadors no es distribueixen d'una forma regular ni al llarg del temps ni de l'espai.

Els registres històrico-testimonials també han estat objecte d'anàlisi per tal de determinar la relació entre magnitud i freqüència. Existeixen diversos autors que exposen aquests resultats en gràfics que relacionen la magnitud amb la freqüència acumulada a partir d'extensos registres en obres linials recollides per empreses de manteniment d'aquestes (Hungar et al., 1999; Dussauge-Peisser, C., 2001) i han determinat que la gràfica que representa aquestes dades sobre uns eixos logarítmics s'ajusta a una funció de tipus potencial negativa, com la que ja s'ha considerat en altres estudis de riscos associats als terratrèmols (Gutenberg i Richter, 1949 a Dussauge-Peisser, C., 2001) i que han estat usats per a estimar el període de retorn d'un fenomen de determinada magnitud.

Tant la dendrocronologia, com els registres historico-testimonials, com la mesura dels blocs presents a les tarteres presenten la dificultat de recollir dades sobre els fenòmens de menor magnitud i alhora tenen uns límits temporal i espacial a partir dels quals no se'n tenen dades.

L'avaluació quantitativa del risc és un aspecte que ha anat guanyant rellevància en el camp dels moviments de vessant. Durant els darrers anys, els avenços tecnològics permeten una adquisició de dades més detallada i també un anàlisi més intens d'aquestes. Aquests avenços permeten quantificar d'una forma més precisa cada un dels factors de risc. Per a l'anàlisi quantitatiu, un dels aspectes més conflictius segueix sent la determinació de la probabilitat temporal amb que es donen els fenòmens, ja que l'escala temporal utilitzada és generalment massa petita en relació amb l'ordre de magnitud temporal en que tenen lloc els canvis de caire geològic. Cal passar d'una escala de temps a nivell humà a una escala de temps a nivell geològic. Un recull dels fenòmens succeïts en el passat, que escapen

de la percepció humana, però que deixen evidències a nivell geològic és una forma de superar aquestes limitacions.

1.5. OBJECTIUS I MOTIVACIÓ

L'anàlisi quantitativa del risc comporta la necessitat d'establir relacions entre magnitud i freqüència. La falta de registres històrics suficientment extensos dóna lloc a la recerca d'un mètode que ofereixi dades suficients per a establir aquesta relació. Amb aquest motiu s'ha utilitzat el Principi d'Actualisme, que determina que els processos naturals que han existit en el passat són els mateixos que actuen en el present. Així, estudiant les característiques d'esdeveniments passats podem assimilar-les als fenòmens que poden succeir en el present. La zona estudiada s'ha anat desmantellant al llarg del temps progressivament a partir de desprendiments en els quals la predisposició de fractures hi té molta influència, ja que en determinaran el volum individualitzat i susceptible de ser després. La superfície actual del vessant presenta afloraments on hi predominen cares lliures de les diferents discontinuïtats que interrompen el massís i que s'han anat descobrint a mesura que se'n desprèn el material que individualitzen. Aquestes superfícies es consideren indicis de desprendiments passats i seran analitzades per a entendre el paper de les juntes al massís rocós i la seva relació amb el desencadenament de desprendiments.

La magnitud d'un desprendiment la determinarà el volum després i alhora aquest estarà determinat per la grandària de les superfícies que el limiten.

Amb aquest objectiu s'ha portat a terme l'anàlisi dels punts recollits per un TLS (*Laserscanner* terrestre). S'ha hagut de desenvolupar un procés que permetés transformar aquests punts en superfícies separades segons la família de discontinuïtats a la qual corresponen.

En funció dels resultats obtinguts amb l'ús del TLS i a partir de contrastar-ho amb els resultats de camp al Solà d'Andorra, es farà una avaluació de la funcionalitat del TLS i els principals avantatges i inconvenients que suposa el seu ús amb la metodologia emprada per als objectius esmentats.

1.6. MARC SOCIOGEOGRÀFIC

El Principat d'Andorra és un estat situat al vessant sud del Pirineu Axial, es troba situada entre França al nord i Espanya al sud. Ocupa una regió de 467.8 km² i té una població de 84.484 habitants. És dividida en set unitats administratives locals anomenades parròquies, gestionades per comuns: Canillo, Encamp, Andorra la Vella, Ordino, La Massana, Sant Julià de Lòria i Escaldes-Engordany. La seva capital és Andorra la Vella, amb una superfície de 30 km² i una densitat de població de 786,23 hab/km².

Andorra té un relleu muntanyós abrupte i amb desnivells importants, característiques típiques de les zones d'alta muntanya. La cota més alta és el pic de Coma Pedrosa. La cota més baixa és el punt fronterer amb Catalunya, de 838 m. El Principat d'Andorra se situa a la conca del riu Gran Valira, que presenta altres rius afluents, com són el Valira d'Orient, el Valira del Nord, el Madriu i el riu d'Ós. El riu Gran Valira transcorre seguint una direcció pràcticament nord-sud des d'Andorra la Vella fins a la plana de la Seu d'Urgell. És a Andorra la Vella on conflueixen els rius del Valira d'Orient, del Nord i del Madriu per a donar lloc al Gran Valira.

Gran part dels cims del Principat presenten altituds superiors a 2.500 metres, entre els quals cal destacar el Comapedrosa (2.942m), el Medacorba (2.914m) i l'Estanyó (2.915m). El fons de les valls principals solen estar situades per sota dels 1.500m d'altitud. Els sectors més deprimits es troben al sud d'Andorra la Vella, on el Gran Valira transcorre per un fons de vall situat a altituds compreses entre 800 i 1.000m.

En resum, l'orografia general del Principat es pot descriure com tot un conjunt de muntanyes d'alçades similars on s'encaixen múltiples valls. Aquestes valls configuren una xarxa fluvial principal amb forma de "Y" marcada pels rius Valira d'Orient, Valira del nord i Gran Valira.

El clima d'Andorra és de muntanya mediterrani. La temperatura oscil·la entre els 24°C a l'estiu i els 2° a l'hivern.

El sector on s'ubica l'estudi (Figura 3) és el conjunt de vessants muntanyosos existents a la part baixa del Solà d'Andorra, que anomenem solà de Santa Coloma, a l'E del roc de Sant Vicenç, passant per el canal del Forat Negre fins al Canal de l'Alzina. Els vessants, situats a tocar de la ciutat d'Andorra la Vella, presenten una dinàmica de despreniments especialment activa. Al seu peu, hi

trobem la població de Santa Coloma, que arriba fins als límits de les zones de major acumulació de blocs provinents d'aquests vessants.

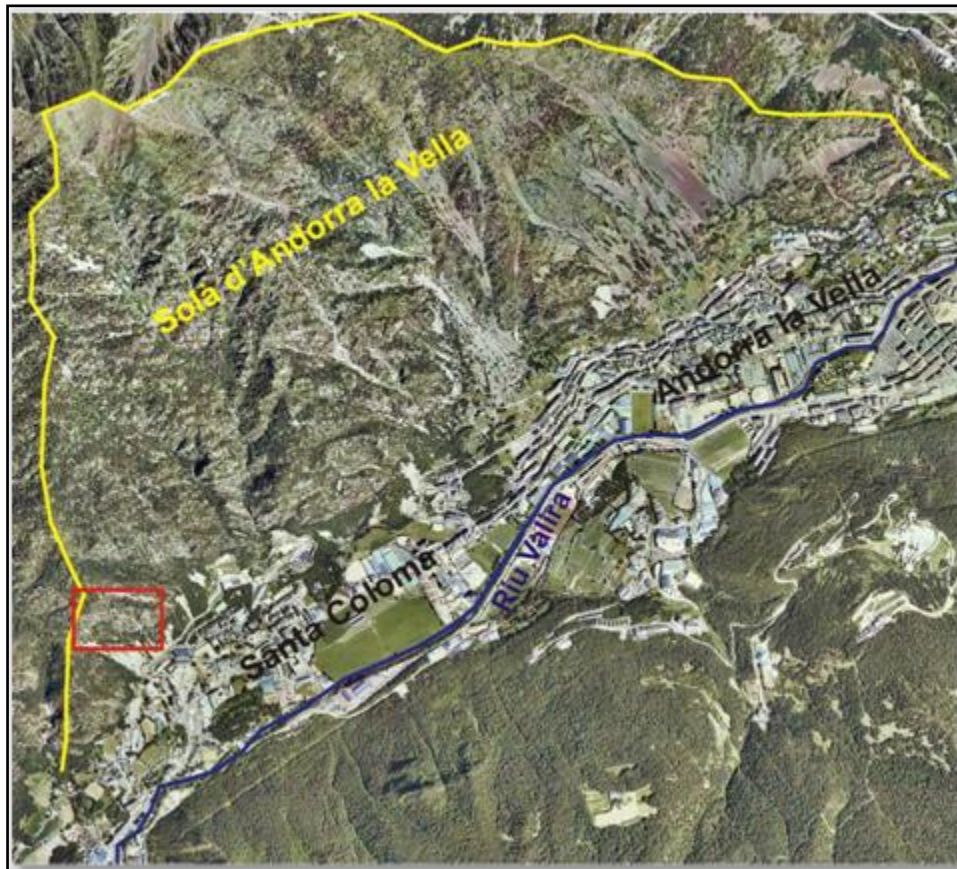


Figura 4. Situació de la zona d'estudi (requadre vermell) al Solà d'Andorra la vella

1.7. MARC GEOLÒGIC

1.7.1 LITOLOGIA

La litologia d'Andorra és formada per tres unitats fonamentals: El sòcol, la cobertura i els materials post orogènics.

El sòcol, d'edat preferentment paleozoica, és constituït per roques metasedimentàries: Pissarres grises amb intercalacions primes de calcàries i gresos, roques carbonàtiques i pissarres i calcàries negres intensament deformades durant l'orogènia herciniana i amb intrusions granítiques.

La cobertura està formada per roques sedimentàries mesozoiques i terciàries que es troben discordants damunt del sòcol. Els materials post orogènics agrupen dipòsits del neogen i del quaternari de tipus glacial i periglacial, dipòsits fluviotorrencials, col·luvions i dipòsits generats a partir de grans esllavissades, disposats de forma

discordant damunt el sòcol i la cobertora. Aquests últims, son els únics materials que no son afectats per l'orogènia alpina.

El solà d'Andorra la Vella és format per granodiorites (roques que afloren a la zona d'estudi) i en menor proporció corneanes, d'edat tardiherciniana, que corresponen a la part més occidental del batòlit d'Andorra-Montlluís, el batòlit més llarg dels Pirineus, estenent-se al llarg de 600 km² al límit entre França, Espanya i Andorra.

La granodiorita presenta més o menys alteració pels agents meteoritzants i erosius, ja que ha estat afectada per diverses dinàmiques, a partir del aixecament de la serralada pirinenca durant l'orogènia alpina, que provoca que aquests materials quedin elevats i siguin desmantellats progressivament fins a presentar l' orografia actual. La competència d'aquest material i la seva menor intensitat de fractura genera un relleu abrupte, conferint grans parets rocoses. És en aquesta litologia on les glaceres han modelat les formes glacials més evidents.

Al peu del Solà d'Andorra hi trobem dipòsits quaternaris fruit de la dinàmica de vessants, constituït per blocs rocosos de dimensions variables, d'un volum d'entre 0.5 i 15 m³ i d'entre 0.02 i 1 m³ en el cas de les cornianes (Copons, 1997).

1.7.2 HISTÒRIA GEOLÒGICA I TECTÒNICA DE LA SERRALADA PIRINENCA

La serralada pirinenca és un orogen del cicle alpi que s'ha desenvolupat en el contacte entre les plaques ibèrica i eurasiàtica. D'est a oest s'estén des de Provença, on queda obliterat per les estructures dels Alps, formats amb posterioritat als Pirineus, fins més enllà de Galícia, al mig de l'Oceà atlàntic, on limita amb escorça oceànica formada a la dorsal atlàntica.

A la península ibèrica, la serralada pirinenca es divideix longitudinalment en dues unitats estructurals: els Pirineus Centreorientals i els Pirineus Occidentals (on es troba el Principat d'Andorra). Transversalment, també diferenciem dues unitats estructurals, la Zona Meridional i la Zona Septentrional, amb estructures vergents cap al sud i cap al nord respectivament (Figura 4).

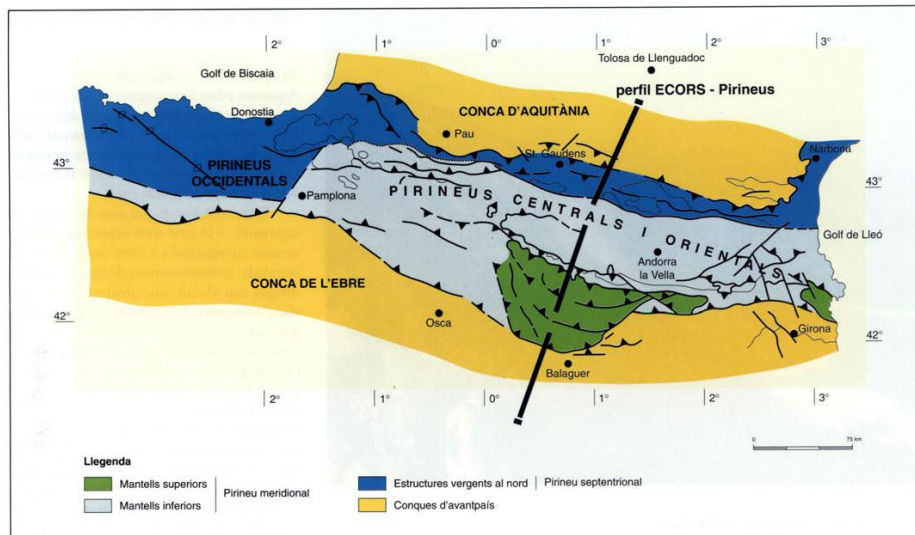


Figura 5. Estructura tectònica dels pirineus. (Font: Tall geològic del Pirineu central 1:200000. Servei geològic de Catalunya i Institut Cartogràfic de Catalunya. 1993)

Les característiques dels diferents sectors de l'orogen pirinenc són el resultat del moviment relatiu entre les plaques eurasiàtica, ibèrica i africana i de l'evolució dels seus límits durant els temps secundaris i terciaris. Durant el Secundari o Mesozoic, simultàniament amb l'obertura de l'Atlàntic, la placa ibèrica es comença a separar de l'eurasiàtica i comença així un procés de *rifting* a la zona de contacte durant el cretaci inferior.

Cap al Golf de Biscàia, durant aquest procés de *rifting*, l'escorça continental es trenca i es forma escorça oceànica. Cap al centre (Pirineus ístmics) i est, aquest estirament no és tant intens i no s'arriba a l'oceanització. Es desenvolupen, però, fosses tectòniques que es van reblint de sediments de forma sincrònica a l'extensió, la placa Ibèrica gira ara en sentit levogir.

Durant el Cretaci Superior, la placa ibèrica es desplaça lateralment en sentit levogir respecte a l'europea. En aquesta fase de deformació es generen falles de tipus *dip slip* senestres paral·leles a l'eix longitudinal de la serralada. L'apilament antiformal de la zona axial és limitada al N per la falla nord pirinenca, que es considera el límit entre les dues plaques. Es tracta d'una zona de falla estreta, que es caracteritza per la presència de materials del Juràssic i del Cretaci inferior, afectats per una deformació i un metamorfisme d'un gradient tèrmic elevat, desenvolupat durant el Cretaci mig (-95Ma). En aquesta zona, afloren roques granítiques de l'escorça inferior i roques originàries del mantell superior (Iherzolites). Les unitats nord-pirinenques se sobreposen, a través de l'encavalcament frontal nord-

pirinenc, als terrenys terciaris de la conca d'Aquitània, conca d'Avantpaís nord- pirinenca (Figura 4).

Entre el cretaci superior i el Miocè inferior, les plaques ibèrica i eurasiàtica convergeixen. En el domini dels Pirineus centrals, la placa ibèrica continental va subduint sota l'eurasiàtica, també continental. Això provoca la col·lisió i engruiximent de la zona entre plaques durant el Cretaci superior fins a l'Eocè superior i el conseqüent aixecament dels Pirineus, que ja havien estat fallats i aprimats durant l'extensió mesozoica. Finalment, el cicle alpí comença a afectar a la zona més oriental, en la qual comença un procés distensiu amb l'obertura del golf de Lleó i la generació de fosses com la del Vallès-Penedès al litoral català.

Les estructures principals de la Serralada Pirinenca, molt coneguda gràcies a les tècniques geofísiques i particularment amb el perfil sísmic de reflexió profunda ECORS-Pirineus, realitzat els anys 1985 i 1986 (figura 5), són els plecs i encavalcaments d'edat alpina, amb una direcció predominant NWW-SEE paral·lela a l'eix de la serralada. Amb aquest perfil s'observa una diferenciació entre les escorces superior i inferior, amb l'escorça superior formada per un sistema d'encavalcaments que formen una geometria en forma de ventall.

1.7.3 EL BATÒLIT DE MONTLLUÍS-ANDORRA, FASES DE DEFORMACIÓ

L'estudi de l'estructura hercínica dels Pirineus és difícil, ja que s'hi troben superposats dos cicles orogènics. Als granits s'hi poden trobar marcadors cinemàtics que poden ser molt bons indicadors de les deformacions sofertes a partir de l'estudi de l'anisotropia de la susceptibilitat magnètica.

El massís granític de Montlluís- Andorra, datat amb el mètode Rb-Sr, té una edat aproximada de 277 ± 7 M.A (Vitrac-Michard & Allègre 1975) indica un tancament post-Varisc del seu sistema isotòpic. Aquest batòlit pertany a la zona axial, al sud de la falla nord pirinenca. A Andorra la Vella intrueix sediments del paleozoic i formacions més recents cap a l'W, d'edat carbonífera. L'extrem W del plutó és per tant considerat com a representant de la part alta estructural del sostre. L'extrem occidental del batòlit, descrit com si tingués zonacions en forma d'estrat, representa el que seria la base del plutó. Aquesta base forma una estructura domal .

A partir de l'estudi de l'anisotropia de la susceptibilitat magnètica realitzada per Bouchez i Gleizes, s'ha determinat que hi ha dues fases de deformació, aquestes son representades per dues famílies d'estructures internes: la primera marca unes microestructures (família I) repartides i homogènies en tot el batòlit, presenten una orientació NE-SW i es formaren durant l'emplaçament del magma. La segona (família II), presenta una orientació NW-SE, es troba únicament en zones de cisalla anomenades corredors, és posterior i s'hi troben microestructures de deformació en estat subsòlid. Aquestes suggereixen que la geometria del plutó és la d'una llosa inclinada cap al NW, de més de 5 km de gruix i 50 km de llargària. La família I d'alineacions magnètiques, constants al llarg del plutó, d'orientació NE fa pensar en un emplaçament del magma en estadis compressius (Bouchez & Gleizes, 1995). Pel que fa a les estructures de la família II, alineades NW- SE, contrapesa el patró estructural de la família I i registra un estadi de deformació posterior a l'emplaçament (Bouchez & Gleizes, 1995). És interpretat com una falla inversa dextra. El sentit dextre és agafat de les milonites observades als corredors (Bouchez & Gleizes, 1995).(Figura 6).

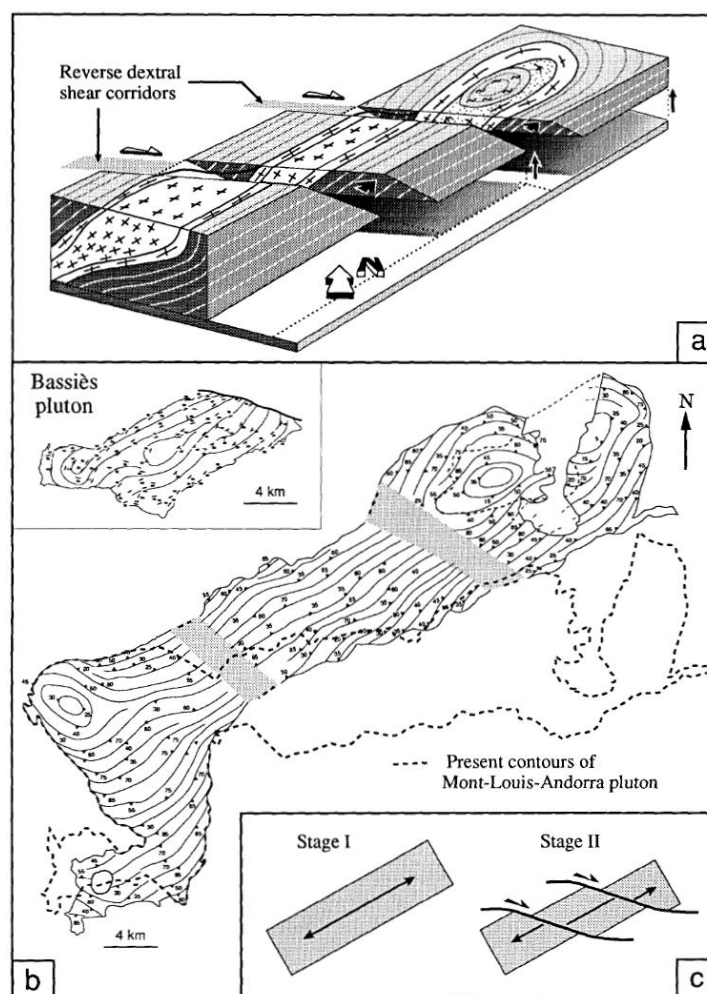


Figura 6 Fases de deformació del batòlit de Mont-Louis-Andorra. (Font: Two stages of deformation on the Mont Louis Andorra Pluton Bouchez & Gleizes, 1995)

La granodiorita que trobem al Solà de Santa Coloma es troba intensament fracturada. A grans trets, s'hi poden diferenciar quatre famílies principals de fractures que formen dos sistemes conjugats. Un dels sistemes de fractures té una direcció NE-SW i cabussaments conjugats cap al SE i cap al NW. L'altre sistema té direcció entre E-W i SE-NW i cabussaments també conjugats (Moya 2002). L'angle de cabussament d'aquestes famílies principals és elevat, superant generalment els 50° . L'edat d'aquestes fractures és difícil de determinar a partir de les seves mineralitzacions, ja que si bé es podrien haver desenvolupat durant l'orogènesi Hercínica, hi ha hagut un rejoc tectònic durant la deformació alpina que aporta mineralitzacions més joves, donant lloc a incerteses alhora de datar-ne l'origen. Els filons que travessen la granodiorita, coincideixen amb l'episodi post-rift del Cretàcic Superior, es a dir, moment en que es produeix la rotació senestra de la península ibèrica, la qual porta

associada la formació de la falla nord pirinenca i la circulació de fluids (Montigny et al., 1986).

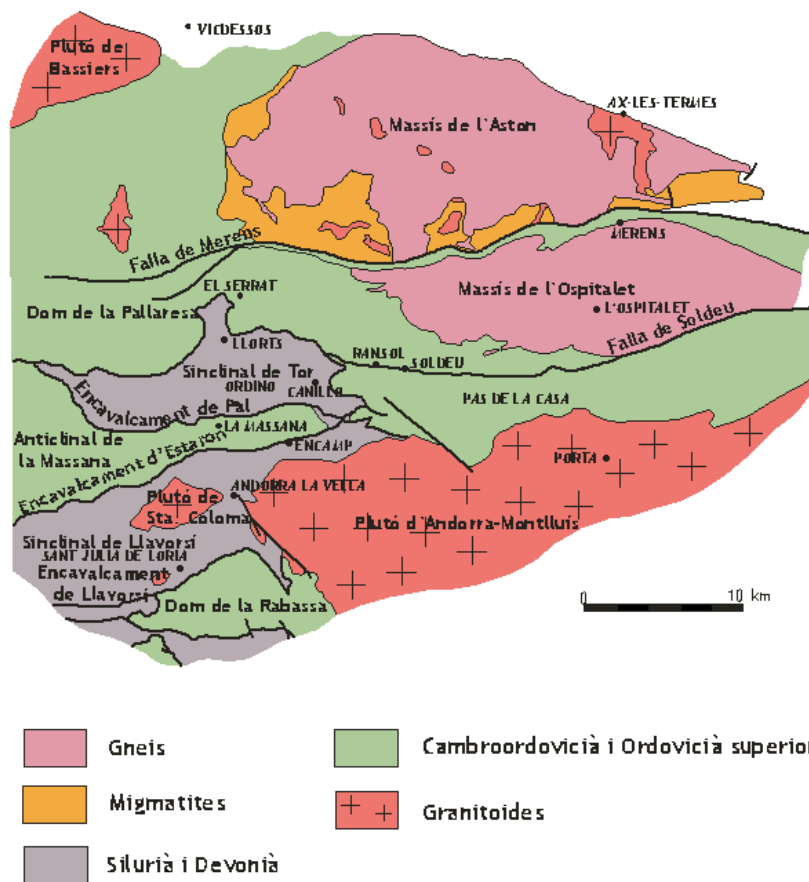


Figura 7. Esquema amb les principals macroestructures d'Andorra. Modificat a partir de Hortevelt (1970), Bessonnet (1990) i Poblet (1991). Font: CRECIT. Autors: Josep M^a Casas i Iban Masachs 2002 (UB).

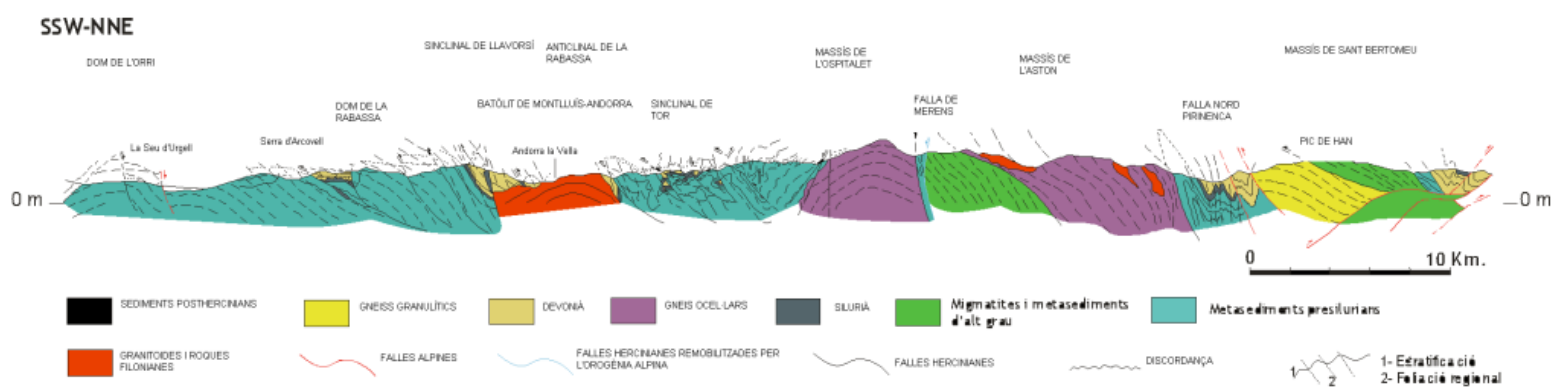


Figura 8. Tall geològic SSW-NNE de les estructures geològiques d'Andorra i rodalies. Font: CRECIT. Autors: Josep M^a Casas i Iban Masachs 2002 (UB).

1.7.4 GEOMORFOLOGIA

Al relleu del Principat d'Andorra es poden diferenciar, a grans trets, dos grans sectors: un sector nord corresponent a les conques dels rius del Valira d'orient del Nord i Del Madriu i un sector sud corresponent als vessants de les muntanyes situades als marges dels rius Gran Valira i D'ós.

Al sector nord, el modelat glacial heretat és el predominant. Aquest modelat es caracteritza per les valls obertes en forma de U i per circs en les capçaleres de les muntanyes. Aquest modelat es troba retocat bàsicament pel modelat postglacial dels vessants. D'altra banda, als sector sud, el modelat fruit de la dinàmica dels vessants és el predominant i es combina amb el fluviotorrencial al fons de les valls.

A continuació es detallen les formes de relleu resultat del modelat generat per diferents processos morfogenètics que s'han anat desenvolupant al llarg de tres períodes donant lloc a tres relleus diferenciats:

- El relleu preglacial, desenvolupat durant el període comprès entre la formació dels relleus estructurals a finals de l'orogènia Alpina i el inici de les glaciacions quaternàries. Aquest tipus de relleu es caracteritza per presentar extenses superfícies d'aplanament on es van s'han encaixat les xarxes fluvials pirinenques en aquelles zones de més debilitat del substrat rocós amb una direcció aproximada Nord- Sud.

- El relleu glacial es forma durant el pleistocè, comprèn tot un cicle en el qual es desenvolupa un període glacial seguit d'un d'interglacial. En cada període glacial, les glaceres van eixamplant les xarxes fluvials prèvies al passar-hi i es van formant les formes típiques del modelat glacial que esborren les anteriors formes de modelat preglacial, tant d'erosió: Circs, cubetes de sobreexcavació, valls en U...com d'acumulació: morrenes, cons proglacials, complexos justaglacials...

- El relleu postglacial, format durant l'Holocè, amb processos morfogenètics similars als actuals: Fluvials, fluviotorrencials, dinàmica de vessants i nival. Aquests processos encara no han esborrat les formes del modelat glacial. Trobem junt amb aquestes, el modelat produït durant el període postglacial que rebleix les antigues cubetes de sobreexcavació. Es produeixen dipòsits com els cons de dejecció d'antics corrents d'arrossegalls.

Al Solà d'Andorra, el modelat més actiu i objecte d'estudi en aquesta tesina és l'estructural, marcat per el substrat rocós granodiorític, molt resistent i que dona lloc a escarpaments rocosos coincidents amb les formes de relleu, essent els plans de fractura els que en configuren la principal expressió morfològica.

La presència de nombroses fractures i la soscavació que presenten les valls genera una morfologia en desequilibri que es compensa en forma de freqüents moviments de vessant, a vegades molt violents. A continuació es presenta un llistat dels darrers fenòmens de desprendiments al Solà de Santa Coloma.

Desprendiments succeïts els últims anys al solà de Santa Coloma		
DATA	VOLUM TOTAL DESPRÈS (m³)	VOLUM INDIVIDUAL MÀXIM (m³)
1968	-	8
Des de 1968 a 1984	-	1
Durant 1984	-	-
Gener 1994	-	-
Inicis 1996	-	-
17/04/2000	4	-
Novembre de 2001	4	-
Novembre de 2002	10	-
17/08/2003	10	2.3
02/04/2004	20-30	4
20/04/2008	150	31.7

NOTA: Els valors son aproximats, editat per Euroconsult i Eurogeotecnica

Taula 1. Fenòmens antecedents al Solà de Santa Coloma

2. TREBALLS REALITZATS

2.1 RECULL SISTEMÀTIC DE DADES SOBRE LES DISCONTINUÏTATS

Per a determinar la tipologia i característiques de les fractures existents, s'ha desenvolupat un treball de camp basat en la mesura de la disposició de les juntes i l'observació de les característiques geomecàniques més rellevants.

Existeixen diversos mètodes utilitzats actualment per a l'estudi de l'espaiament i persistència de les discontinuïtats, d'una forma sistemàtica, per tal de fer-ne un tractament estadístic com son el *Sampling Window*, que consisteix a comptabilitzar i mesurar l'orientació i llargària de discontinuïtats dins d'àrees de mostreig o *l'scanline*, que mesura aquestes propietats a les discontinuïtats que creuen determinades línies traçades sobre els afloraments rocosos (Mauldon et al., 2000; Priest, 1993; Pahl, 1979). El mostreig tipus *Sampling Window* s'ha descartat davant la impossibilitat d'accedir a grans àrees planeres on desenvolupar-lo, en canvi, el mètode de mostreig a partir de fer *scanlines* és més adaptable al solà d'Andorra, on les superfícies que trobem tendeixen a ser plans esglaonats amb una forta pendent. La impossibilitat d'accedir a les zones més altes limita el mostreig a zones que sovint son les parts baixes o del contorn dels vessants.

Es defineixen a continuació els conceptes que s'utilitzen en l'aplicació d'aquest mètode:

Discontinuitat: Terme general per a una ruptura mecànica amb un esforç tensional nul o molt baix en un massís rocós.

Família de discontinuïtats: Es consideren de la mateixa família de discontinuïtats aquelles que presenten una orientació i valors de cabussament similars, tolerant-hi una determinada dispersió. Per al material granític, aquests valors de dispersió son força elevats en algunes famílies de discontinuïtats. De totes formes, s'ha optat per separar les famílies amb valors d'orientació i cabussament el més propers possible.

Distància d entre discontinuïtats de la mateixa família: És la distància, entre dues discontinuïtats adjacents i de la mateixa família, mesurada al llarg d'una línia més o menys rectilínia i d'una

determinada orientació en una superfície d'un aflorament rocós. Com que aquest valor es genera entre discontinuïtats de la mateixa família, dependrà de l'orientació de l'*scanline*, de manera que el que es mesura són els espaiaments aparents. L'espaiament real serà l'aparent, que equival a aquesta distància d , multiplicat per el sinus de l'angle entre la línia de medició i la direcció de la família.

Mitjana dels espaiaments x d'una família de discontinuïtats: És la mitjana dels espaiaments entre les discontinuïtats, calculada com:

$$x = \sum_{i=1}^{i=n} x_i / n$$

S'extreuen també, per a cada família, els espaiaments màxims i mínims trobats al llarg dels *scanline*.

Llargària l de la discontinuïtat: És la llargària mesurable de la traça lineal produïda per la intersecció d'una discontinuïtat amb l'aflorament. El final d'aquesta discontinuïtat pot ser visible, donar-se en contacte amb una altra discontinuïtat o bé acabar en la roca intacta. En molts casos però, la vegetació, el relleu o formació superficial no deixen veure aquest final. En qualsevol cas, se'n mesura només la traça observable i s'anota quin final té.

Mitjana de la llargària γ de les discontinuïtats:

És la suma de la llargària de totes les discontinuïtats interceptades dividida per el nombre de mesures realitzades.

$$\gamma = \sum_{i=1}^{i=n} l_i / n$$

Aquesta dada ens serveix per a comparar i conèixer quines són les famílies amb major continuïtat i comprovar així si aquesta és una dada en comú a tots els sectors.

2.2 ANÀLISI ESTRUCTURAL

Per a determinar les relacions estructurals entre les famílies de discontinuïtats, es detallen aquells casos en els quals la traça queda tallada per una altra discontinuïtat a les interceptades per l'*scanline*. En aquest cas s'anota l'orientació de la discontinuïtat tallant. Aquesta dada es compara als diferents afloraments amb l'objectiu d'establir

una relació temporal entre la generació de les diferents famílies de discontinuïtats.

S'ha caracteritzat la tipologia de les diferents famílies de discontinuïtats, diferenciant-les segons famílies de diàclasi o bé famílies de falles, observant el desplaçament i la forma en que es tallen unes juntes respecte les altres es podrà estudiar si les dimensions del bloc que individualitzen son condicionades per aquesta relació. El criteri per a determinar aquesta relació és el següent:

Si es tracta de falles, les que son posteriors tallaran i desplaçaran a les anteriors. Si dues famílies de falles es desplacen de forma mútua, llavors es consideren sincròniques (figura 3, a).

Si es tracta de diàclasi, aquestes no progressaran a través de les discontinuïtats que ja existeixen al massís rocòs (figura 3, b).

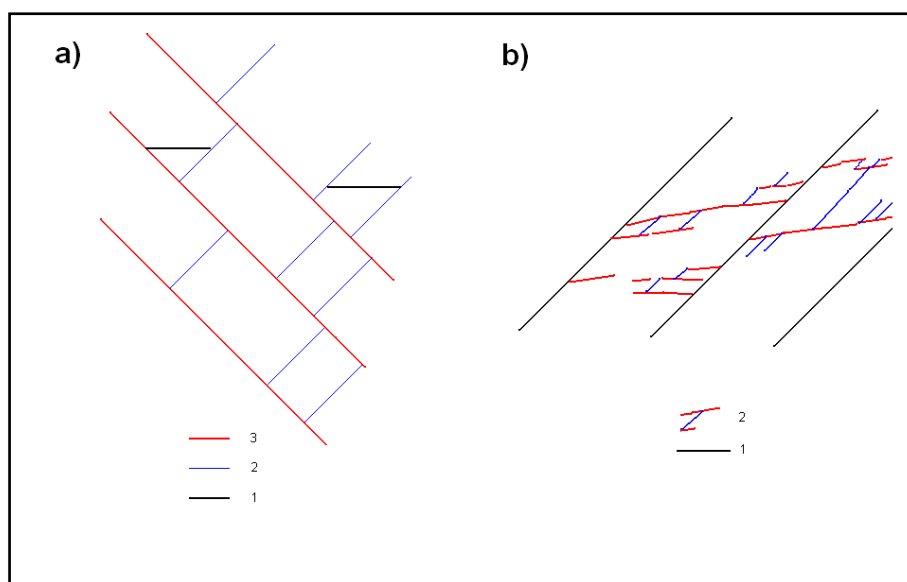


Figura 3. Relacions estructurals entre les famílies

2.3. MÈTODE DE RECONeixEMENT MITJANÇANT EL LASERSCANNER TERRESTRE (TLS)

El laserscanner terrestre (TLS) és un instrumental que captura de forma massiva punts en 3D a una velocitat i amb una precisió molt elevades. El TLS va començar a utilitzar-se als anys 90 en àrees com l'orientació mòbil aplicada a la robòtica (Singh et al, 1991) i va evolucionar més tard en la construcció de models 3D d'objectes a escala mètrica com escultures (Beraldin, 2000) o aplicacions industrials (Sequeira et al, 2003). Actualment, la distància d'escaneig

pot arribar a ser molt major (long-range laser scanners) i han augmentat així les aplicacions d'aquests aparells com ara obtenir models 3D de grans superfícies (arquitectura, patrimoni històric, topografia...) la caracterització, control i seguiment de perills naturals com volcans o de moviments (Rowlands, 2003; Bitelli et al, 2004).

El TLS consta d'un instrumental de mesura (laser) i un altre d'escombrada de punts (scan). El raig laser incideix i es reflexa directament sobre la superfície del terreny, amb l'avantatge de que no son necessaris prismes reflectors intermedis (*reflectorless*). El TLS que s'ha utilitzat en aquesta tesina és el model ILRIS-3D de la casa OPTECH (figura 11). Té una presció de 3mm a una distància de 100 metres (www.ilris-3D.com), del mateix ordre de magnitud que una estació total. El TLS es capaç d'obtenir una mitjana de 2000 punts per segon, aquesta gran velocitat en l'adquisició d'informació li permet obtenir les coordenades de milions de punts en només 15 minuts. Dels punts registrats se'n coneix la seva posició respecte a un sistema de referència definit pel propi aparell.



Figura 11. Laser escàner terrestre (TLS)

Posteriorment, aquests punts poden ser importats a un software tipus CAD (*Computer Aided Desing*) per a la seva posterior visualització i tractament de dades. L'arxiu de sortida d'aquesta escombrada és un arxiu tipus ASCII, amb columnes per a les coordenades X, Y i Z i també una columna per a la intensitat del senyal reflectit, que dependrà principalment de l'angle d'incidència del laser a la superfície de reflexió, de la rugositat d'aquesta, de l'absorció del material

escanejat, la humitat, condicions ambientals com pols, boira, temperatura...Tot i aquest gran conjunt de condicionants, es pot obtenir un model digital 3D de precisió centimétrica

Per a escanejar la zona d'estudi s'estaciona l'aparell en punts diferents. Cada un dels escanejos realitzats des de cada estació genera un núvol de punts en el seu propi sistema de referència, els quals han de ser alineats en un sistema de referència comú. Aquesta alineació es realitza a través del solapament de superfícies de l'aflorament homòlogues. Els software específics de tractament de núvols de punts utilitzen normalment el algoritme iteratiu del punt més proper (Iterative Closest Point) per tal d'optimitzar-ne l'alineació (Gruen et al., 2005). Amb l'ús del GPS diferencial es mesura la posició del escàner en cada estació amb precisió centimétrica gràcies a xarxes com el CatNet de l'Institut Cartogràfic de Catalunya o similars. Coneixent la posició del escàner es pot transformar el sistema de referència propi del núvol de punts a un sistema georeferenciat. En aquesta tesina es treballa en el Sistema de Coordenades de la Projectió UTM amb elipsoide i datum WGS84.

En aquest estudi, l'ús d'aquest aparell ha proporcionat un volum de dades que s'han processat amb la finalitat d'obtenir el màxim d'informació sobre les dimensions de les àrees que formen les discontinuïtats al vessant. L'aportació de dades mitjançant el *laserscanner* és molt superior al realitzat amb l'*scanline*, ja que cobreix la totalitat de la zona d'estudi. Amb aquest, s'han comparat els resultats als diferents vessants. Les dades de camp, però, han estat un suport imprescindible per a anar validant la presència i caracterització de les diferents discontinuïtats.

A partir del núvol de punts generats per el *laserscanner*, s'han determinat aquells que son coplanars, es a dir, que pertanyen al mateix pla, alhora que contigus. Per a fer-ho s'han aplicat diverses metodologies, la primera mitjançant l'algoritme desenvolupat per l'Institut de Recerca Geomodels (Garcia-Sellés et al., 2009) i posteriorment, extraient polígons a partir dels grups de punts corresponents al mateix pla, als que s'ha hagut de fer transformacions, ja que posteriorment es treballarà en dos dimensions. Els resultats han de representar el tipus de plans que s'observen a les diferents famílies existents al vessant, amb el qual cal anar comprovant els resultats amb les observacions de camp per a cada família identificada i les fotografies realitzades.

Amb aquest segon procés d'individualització de polígons a partir de punts, se n'han extret dades sobre les àrees que formen aquestes superfícies i la seva funció de distribució.

3. METODOLOGIA

3.1.MÉTODE DE CAMP: ESTIMACIÓ DE L'ESPAIAT I LLARGÀRIA DE LES DISCONTINUÏTATS UTILITZANT RECONeixEMENTS TIPUS *SCANLINE*

El mètode de camp utilitzat ha estat el mostreig tipus *scanline*, proposat per Priest (1993). És utilitzat sobretot en obres lineals talussos d'obra civil i a galeries de mines. S'ha adaptat aquest mètode per a l'estudi de la llargària de les discontinuïtats al Solà de Santa Coloma, això comporta accedir a afloraments rocosos que es disposen de forma escarpada. Per a fer-ho cal buscar el màxim nombre d'afloraments rocosos on l'accés o el treball no presentin importants dificultats. Son preferibles aquells afloraments amplis on s'hi puguin fer *scanlines* en tres direccions diferents i el més perpendiculars possible, per tal de trobar el màxim nombre de famílies de discontinuïtats. La morfologia del Solà de Santa Coloma condiona en gran mesura la disposició dels *scanlines* al llarg d'un contorn, on s'han d'instal·lar més o menys horitzontals o bé inclinats, seguint el pendent dels vessants per a que aquests siguin prou llargs i continus.

Un cop situats a l'aflorament cal trobar cares planes on situar l'*scanline*. Han de ser grans en comparació amb l'espaiament entre les discontinuïtats presents. En aquells afloraments amb molts sortints i entrants rocosos la inclinació de l'*scanline* respecte a la superfície rocosa pot ser molt gran ($>20^\circ$), és preferible llavors, dividir la longitud en diversos grups de *scanlines* esglaonats. Al Solà d'Andorra s'hi han realitzat 7 grups de *scanlines* subdividits en diversos trams en una longitud total de 72 metres. (figura 9).

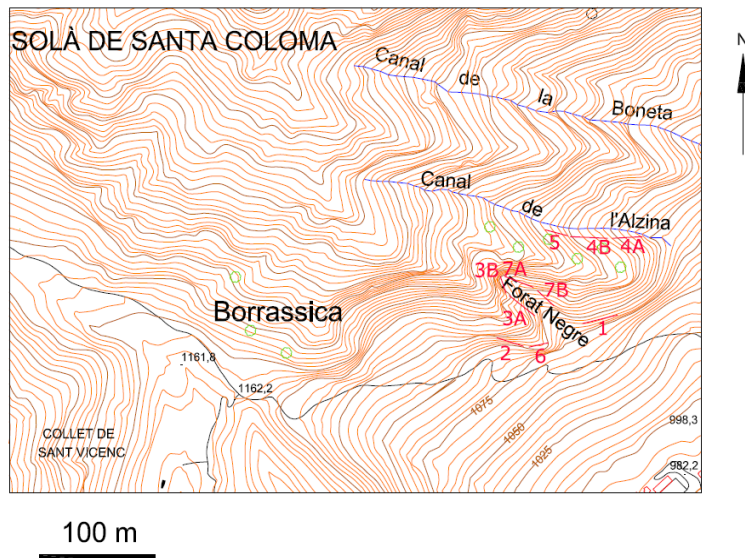


Figura 9. Distribució al terreny dels scanlines realitzats

La intersecció de les discontinuïtats i la cara aflorant dibuixen traces lineals que ens proveeixen essencialment d'una mostra bidimensional de la xarxa de discontinuïtats. Per aquest motiu és convenient tenir-ne 3 d'ortogonals en cada superfície rocosa.

Per a fer l'*scanline*, situem una cinta mètrica de 2 m a 30 m de llarg, l'ancorem a la roca i mesurem la orientació i el cabussament amb que hem col·locat la cinta. És preferible que els límits de l'*scanline* coincideixin amb juntes. Mesurem l'orientació de la línia de màxima pendent i cabussament de la superfície rocosa en la qual fem l'*scanline* i fem una fotografia general de l'*scanline* per a identificar-lo en el posterior processat de dades.

La taula següent conté totes les mesures que es recullen al camp per a cada discontinuïtat interceptada a l'*scanline*.

DADES SCANLINE
SCANLINE NUM
PENDENT
ORIENTACIÓ
ALÇADA
TRIMMING (m)
LONGITUD TOTAL

REF. PLÀNOL
ORIENTACIÓ
CABUSSAMENT
PARET PLANA/SUPERFÍCIE AMB SORTINTS
ALÇADA
AMPLADA

CROQUIS

[illegible]

A la capçalera de la taula hi ha les dades a recollir, tant de l'*scanline* com de la superfície rocosa sobre la qual es realitza. El *trimming* és aquella longitud mínima a partir de la qual no es registraran les discontinuïtats i pot variar decímetres d'un *scanline* a l'altre. Generalment s'han establert *trimmings* de 0.10 o 0.15 m.

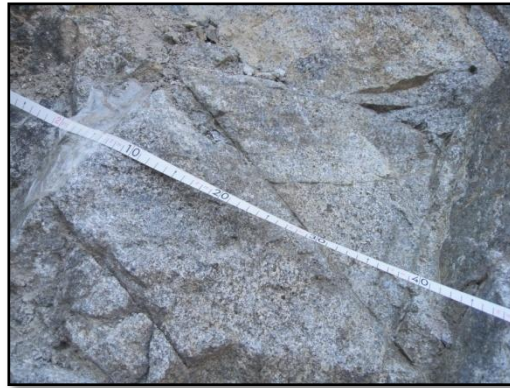


Figura 10. Detall d'un dels *scanlines* sobre superfície rocosa amb sobresortints (a dalt) i plana (abaix)

Un cop instal·lada la cinta mètrica (figura 10), cal anar anotant, per a cada discontinuïtat interceptada al llarg de la línia de l'*scanline*, les dades que es resumeixen a continuació:

Distància a origen: És la mesura des del punt de partida de l'*scanline* a la discontinuïtat que el creua i de la qual en mesurem les altres propietats.

Longitud semitraça 1 i 2: Cada discontinuïtat que creuem amb la línia de l'*scanline* dibuixa una traça sobre la superfície rocosa, les semitraces són les parts de la traça que situades per damunt i per sota de la línia de l'*scanline*.

Tipus de plà: S'anota si es tracta d'una falla o bé és una diàclasi (donat que en aquest estudi la roca és ígnia, en aquest estudi no es trobaran plans d'estratificació).

Direcció de cabussament: És l'angle entre el N magnètic i la línia de màxima pendent del pla de discontinuïtat, mesurat amb brúixola en sentit de les agulles del rellotge, varia entre 0 i 360°.

Angle de cabussament: És l'angle entre el pla horitzontal i la línia de màxima pendent del pla de discontinuïtat i es mesura amb el clinòmetre que pot portar la mateixa brúixola. Té valors entre 0 (pla horitzontal) i 90 (pla vertical).

Tipus de terminació: Anotarem si cada extrem de la traça acaba en una altra discontinuïtat, en matriu rocosa, si no es veu o està tapat. La longitud de semitraça s'estimarà millor o pitjor depenent de si aquesta es pot apreciar més lluny o bé està completament tapada. D'aquesta dada en surt **l'índex de terminació**; que és la proporció de discontinuïtats que acaben en roca intacta. Si el valor és gran, ens indicarà que hi ha pocs blocs individualitzats i si és petit, el contrari.

Obertura i reblert: És la distància perpendicular que separa les parets de la discontinuïtat. El reblert és el material que ocupa l'espai entre els llavis de la discontinuïtat.

Rugositat: El terme rugositat s'utilitza en sentit ampli per a fer referència tant a l'ondulació de les superfícies de discontinuïtat com a les irregularitats a petita escala. Requereix escala decimètrica i mètrica per a l'ondulació de les superfícies: Planes, Ondulades o graonades; i escala milimètrica i centimètrica per a la rugositat o irregularitats: Polides, llises o rugoses.

S'ha volgut registrar quines famílies presenten estries o recristal·litzacions als plans de falla i mesurar-ne l'angle de *pitch*.

Finalment, per tal d'establir un criteri d'ordenació temporal i estructural d'aquestes famílies, també es registren la direcció de cabussament i cabussament d'aquelles discontinuïtats que tallen les juntes que creuen l'*scanline*.

3.2. MÈTODE SEMIAUTOMÀTIC: EL LASERSCANNER TERRESTRE (TLS)

2.1.1 TRACTAMENT DE DADES

Els arxius generats per el *laserscanner* son arxius molt voluminosos a causa de la alta densitat de captura de dades (regulable en funció de la distància). En el cas de l'escaneig realitzat a la zona del Solà d'Andorra, té una densitat de punts molt elevada, existint un punt cada 10-15 cm aproximadament. Aquesta densitat va minvant de les zones més properes a les més llunyanes. En qualsevol cas, el nombre de punts és molt elevat, arribant a la xifra de 22.121.604 punts en tota l'extensió de la zona escanejada.

Aquesta densitat de punts provoca que l'arxiu a tractar ocupi molta memòria i sigui pesat de manejar mitjançant el programari utilitzat, de forma que el primer que s'ha fet és dividir-lo en sis sectors anomenats 1A, 1B, 2A, 2B, 3A, 3B (figura 12). Aquestes divisions es fan de forma que cada sector es correspongui a una unitat homogènia de vessant, amb una orientació i inclinació més o menys regular. Més endavant s'insistirà en aquest tipus de divisió per al tractament de les dades amb la metodologia exposada en aquesta tesina, els motius son apreciar la influència de l'orientació i cabussament d'aquest en les diferències dels resultats i evitar solapar capes de plans de diferents vessants, ja que com es veurà als següents paràgrafs, un cop identificades les famílies es treballa amb abatiments o projeccions de punts. Per a obtenir àrees mesurables a partir d'un núvol de punts, han estat necessàries tres fases, on s'apliquen processos que permeten obtenir, a partir d'un arxiu inicial de punts amb les seves coordenades, polígons individualitzats que emmarquen els punts corresponents als plans on es troben, dels quals se'n calcularan les àrees.

Les dades recollides per el *laserscanner*, com s'ha dit, s'han alineat en un sistema de referència comú ja que les dades dels escanejos tenen zones de solapament. Aquest arxiu representa un model 3D de punts que cobreix tota la superfície dels vessants, amb un punt cada 0.15 m aproximadament.

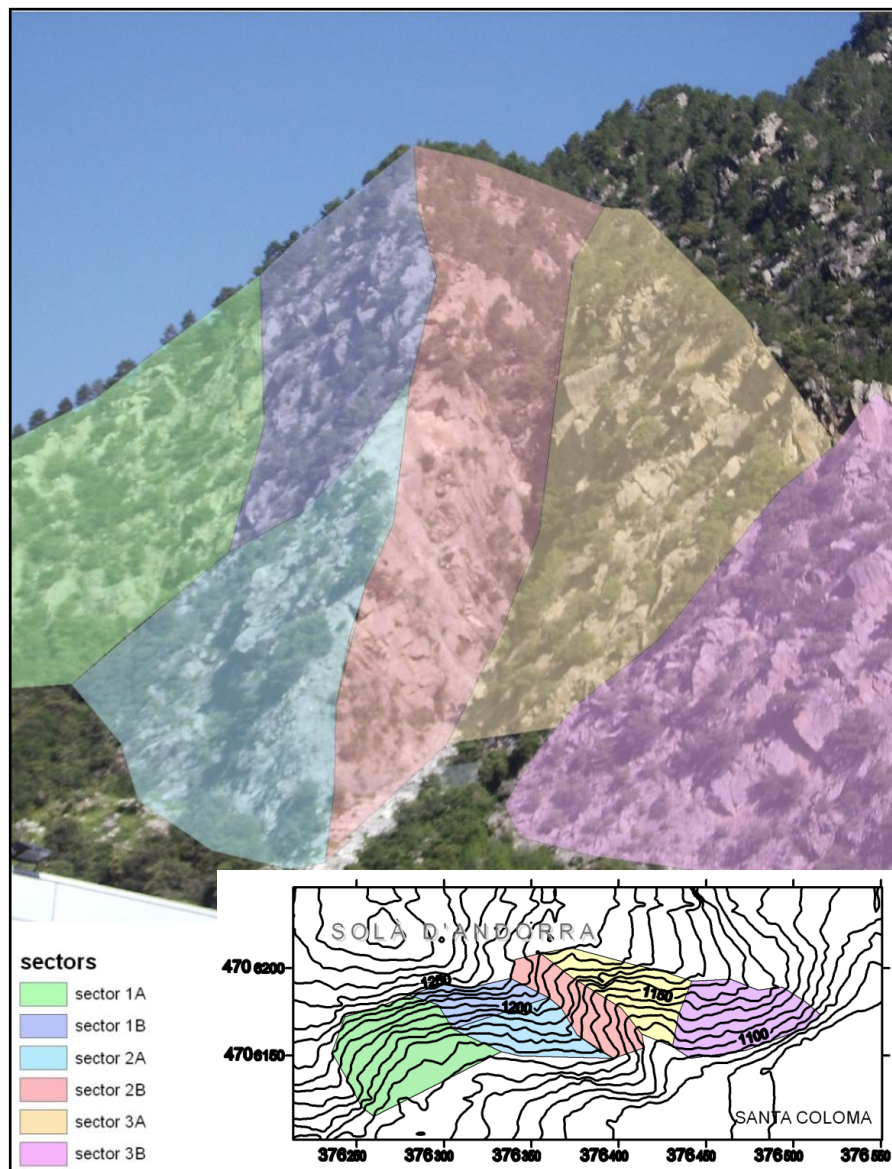


Figura 12. Distribució dels sectors segons les orientacions dels vessants a la zona d'estudi

Obtingut el model 3D es procedeix a aplicar l'algoritme desenvolupat per l'Institut de Recerca Geomodels (Garcia-Sellés et al., 2009) per tal d'obtenir informació sobre la disposició espacial de les famílies de discontinuïtats. Aquest algoritme funciona amb l'entorn *Visual Studio 2008* i és estructurat en quatre rutines.

La primera rutina es basa en relacionar els punts que son propers dins de cel·les. Aquestes limitaran operacions d'interpolació posteriors

que d'altra forma podrien fer-se infinites. Concretament, aquestes cel·les son de 30 cm.

La segona rutina tracta de relacionar els punts entre si, generant normals associades al pla que forma cada punt amb els seus punts veïns. S'afegeix a cada punt la informació de l'orientació del pla mig que forma amb els altres punts existents dins d'un determinat radi fent una regressió planar. Si existeixen punts coplanaris, es a dir, que pertanyen al mateix pla, es podran visualitzar amb el programa *Gocad* (Programa de recerca iniciat el 1989 per la *Computer Science group of the National School of Geology (ENSG)* a Nancy, França. Gestionat per l'*Association Scientifique pour la Geologie et ses Applications*) i comprovar la distribució de les dades de les normals al terreny. El criteri establert per tal de limitar el radi de recerca de plans ha estat la possibilitat de trobar al terreny plans d'aquestes dimensions que puguin generar uns mínims volums de risc. Fent proves amb radis menors i majors que els establerts s'obtenen resultats amb massa plans mitjos petits, de massa detall o pocs plans mitjos molt grans, de forma que s'ha adoptat una solució intermèdia.

Alhora d'establir la regressió planar cal determinar per a aquesta rutina uns valors de colinearitat K (mesura el grau d'ajust dels punts sobre una mateixa recta) i coplanaritat M (mesura el grau d'ajust dels punts sobre un mateix pla). S'estableix K menor a 0.8 i M major a 4 per a una major qualitat de plans (Woodcock, N.H., 1977, Figura 12).

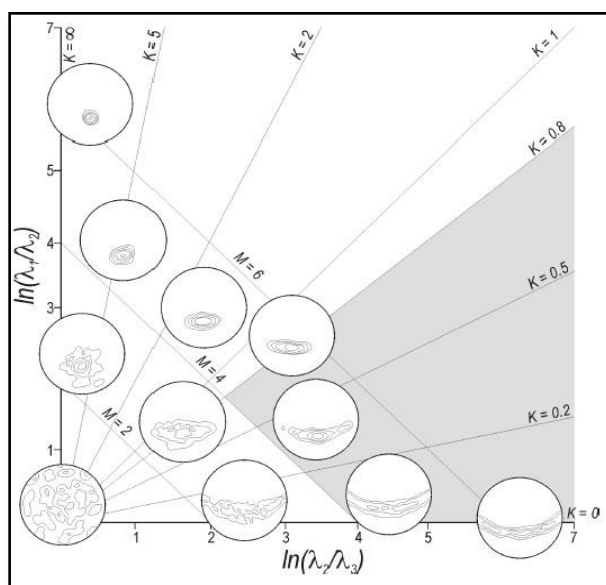


Figura 13. Zona sombreada: Valors de colinearitat i coplanaritat óptims per a aplicar la regressió planar a un núvol de punts. (Woodcock, N.H., 1977). (λ_1 és el valor propi de màxima densitat de punts, λ_3 és el valor propi de mínima densitat de punts i λ_2 representa el valor propi de la normal al pla de coplanaritat).

Amb la segona rutina, els arxius contenen informació per a cada punt de la seva normal associada, alhora expressada també com a orientació de la línia de màxima pendent i del cabussament en dues columnes més i el valor de colinearitat K i el de coplanaritat M amb els punts que l'envolten.

Entre els punts que formen la superfície rocosa n'hi ha que formen part d'altres elements irregulars com vegetació o blocs acumulats al peu del vessant. La següent rutina tracta de fer un filtratge d'aquests elements amb la informació que s'hi ha incorporat en les anteriors rutines. Aquesta rutina analitza la continuïtat dels plans a partir d'especificar els paràmetres que permeten separar el que és irregular del que no. Aquests paràmetres s'estableixen per a cada un dels grups d'orientacions i cabussaments que es troben fent-hi un anàlisi estadístic, i son el radi a partir del qual es considera que els punts estan isolats, un nombre mínim de punts amb una direcció de normal associada semblant i una tolerància determinada. També es poden filtrar a partir de limitar els paràmetres M i K.

En aquest cas es descarten tots aquells punts que es troben en grups de menys de 10 punts i aïllats de la resta una distància superior a 30 cm. Les toleràncies màximes acceptades en aquest cas son al voltant de 30°, donades les irregularitats de les superfícies existents a la zona. S'han comparat els resultats per a paràmetres menors i majors que aquests, amb quantitats menors de punts, segueixen quedant moltes zones de punts irregulars, que no pertanyen a plans. Amb quantitats majors de punts, es perden els plans on la densitat d'escaneig és inferior (zones més allunyades). Amb distàncies menors entre els grups de punts queden també moltes zones irregulars que no pertanyen a plans. I si son majors, es perden les menors superfícies dels plans més irregulars detectats amb l'entorn *Gocad*. Els valors s'han determinat a partir de comparar els resultats de diferents combinacions, variant-ne un dels paràmetres en funció de l'altre. La determinació d'aquests valors depèn sobretot de la rugositat dels plans, els paràmetres introduïts a l'escaneig i la distància d'escaneig.

Finalment, la última rutina consisteix en separar els punts per rangs de direcció de cabussament i cabussament, de forma que separem els punts segons les famílies a les quals pertanyen la seva normal associada. Per a fer-ho, caldrà conèixer quina distribució tenen aquestes famílies i la seva dispersió. Aquest aspecte s'ha resolt agafant mostres representatives dels punts i dibuixant-les amb el

programa *estereonet* (per Johannes Duyster, Institut für Geologie Ruhr-Universität Bochum, Germany). Les distribucions de les famílies en cada sector es presenten a les següents projeccions estereogràfiques:

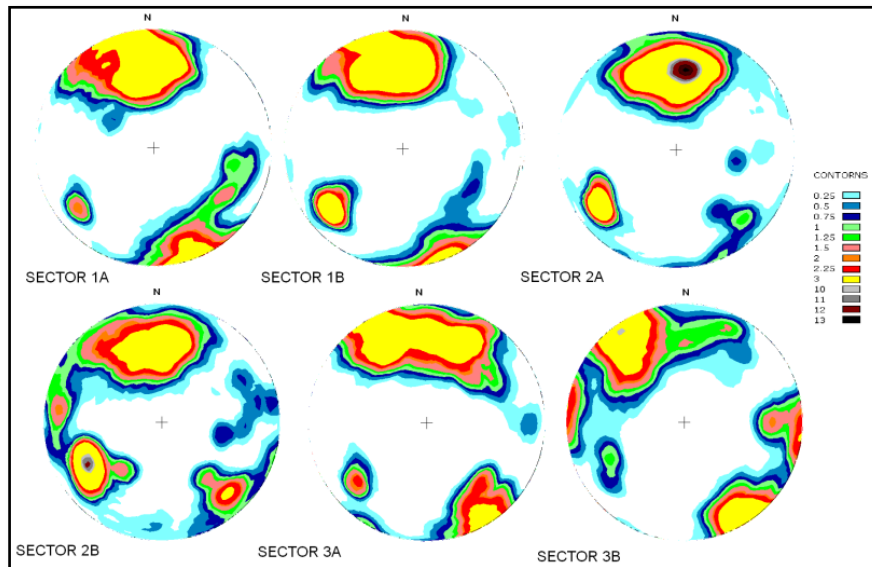


Figura 14. Estereogràfiques dels sectors realitzades amb mostres representatives dels arxius de punts amb informació d'orientació i cabussament.

Un cop introduïts aquests rangs, obtenim amb el programa GoCad (*Earth Science*) la distribució que presenta cada família per sectors. Observant els resultats podem anar redefinint els rangs introduïts amb uns quants cicles de prova i error. Els resultats son satisfactoris quan en l'arxiu d'una sola família les superfícies de punts que visualitzem presenten una certa homogeneïtat, sense la presència d'agrupacions de punts dins d'un mateix pla (esglaonaments, xamfrans...) amb orientacions i cabussaments distants respecte a la mitja.

A continuació, es tornen a crear mostres representatives dels arxius de sortida i es representen en estereogrames per a comparar-los amb els anteriors. En la següent figura (figura 15), on es representen els punts corresponents a totes les famílies separades en un mateix sector, s'hi pot apreciar l'augment de densitat de punts respecte a la figura 14. Corresponen a famílies que queden solapades i on els punts es repeteixen:

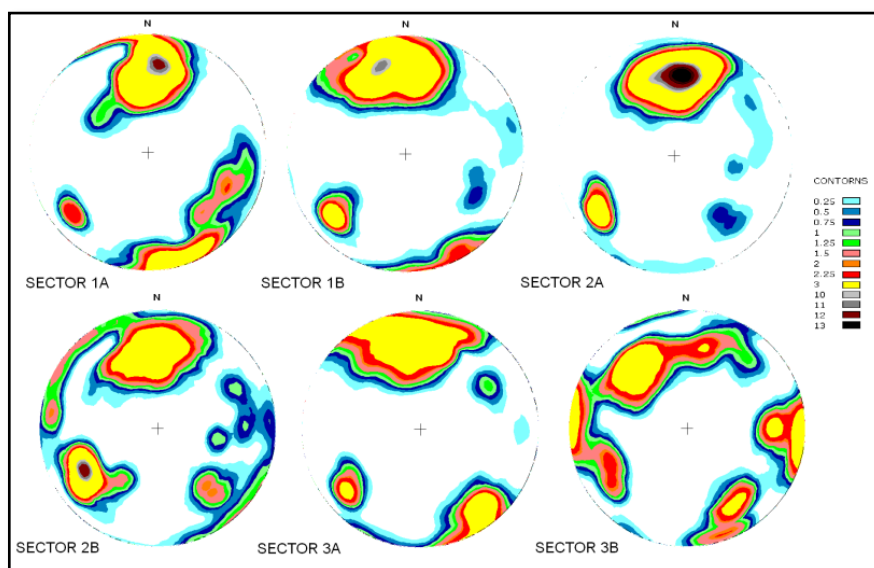


Figura 15. Estereogràfiques dels sectors realitzades amb mostres representatives dels arxius de punts amb informació d'orientació i cabussament un cop separades les famílies.

A continuació es presenta una taula dels rangs utilitzats en cada un dels sectors per tal de separar aquestes famílies. Es pot observar l'alta dispersió de les famílies ja separades per sectors i que aquesta serà major si es considera tota la zona. A les consideracions finals es torna a comentar aquesta dispersió, les seves possibles causes i conseqüències d'aplicar-hi aquesta metodologia. Això i la proximitat entre algunes famílies provoca solapament dels rangs; amb la conseqüent repetició, en famílies diferents, de punts que no s'han pogut separar.

SECTOR 1A		SECTOR 1B	
DIR. CAB.	CAB.	DIR. CAB.	CAB.
F1 40-80	40-80	F1 40-70	55-80
F2 310-360	40-70	F2 270-320	40-70
F3 110-190	20-60	F3 -	-
F4 255-295	45-85	F4 220-280	65-90
F5 160-210	30-65	F5 175-225	30-60
F6 175-225;0-30	65-90	F6 350-360/0-40/160-220	30-60
F7 325-360;140-180	75-90	F7 310-150/120-150	65-90

SECTOR 2A		SECTOR 2B	
DIR. CAB.	CAB.	DIR. CAB.	CAB.
F1 45-85	50-85	F1 30-80	30-80
F2 300-340	30-70	F2 290-330	30-70
F3 110-160	10-70	F3 110-160	15-60
F4 220-290	30-75	F4 230-300/90-120	75-90
F5 150-210	35-80	F5 160-220	25-90
F6 190-230/340-360/0-50	70-90	F6 335-360/0-30/160-190	55-90/80-90
F7 280-310/105-130	70-90	F7 300-350/120-170	80-90

SECTOR 3A		SECTOR 3B	
DIR. CAB.	CAB.	DIR. CAB.	CAB.
F1 40-80	50-80	F1 40-85	50-80
F2 290-350	40-70	F2 300-350	40-70
F3 110-170	25-65	F3 110-160	30-70
F4 230-295	30-90	F4 250-300/70-120	45-90
F5 160-200	30-70	F5 160-200	30-65
F6 160-220/340-360/0-60	70-90/80-90/80-90	F6 190-240/10-50	45-90/80-90
F7 115-180/290-350	65-90/70-90	F7 110-170/300-330	70-90/60-90

Taula 3. Rangs establerts per tal de separar les famílies en diferents arxius.

Es generen a continuació arxius de punts amb informació de la direcció de cabussament i cabussament corresponents a una mateixa família que alhora es troben separats segons sectors als quals

corresponen. En total hi ha 7 famílies separades en sis sectors diferents. Aquests sectors son separats de forma que els punts pertanyen a un mateix vessant d'orientació més o menys regular.

A mode de resum, es presenta un esquema de la generació d'arxius de punts corresponents a la mateixa família a partir de l'arxiu inicial en cada sector:

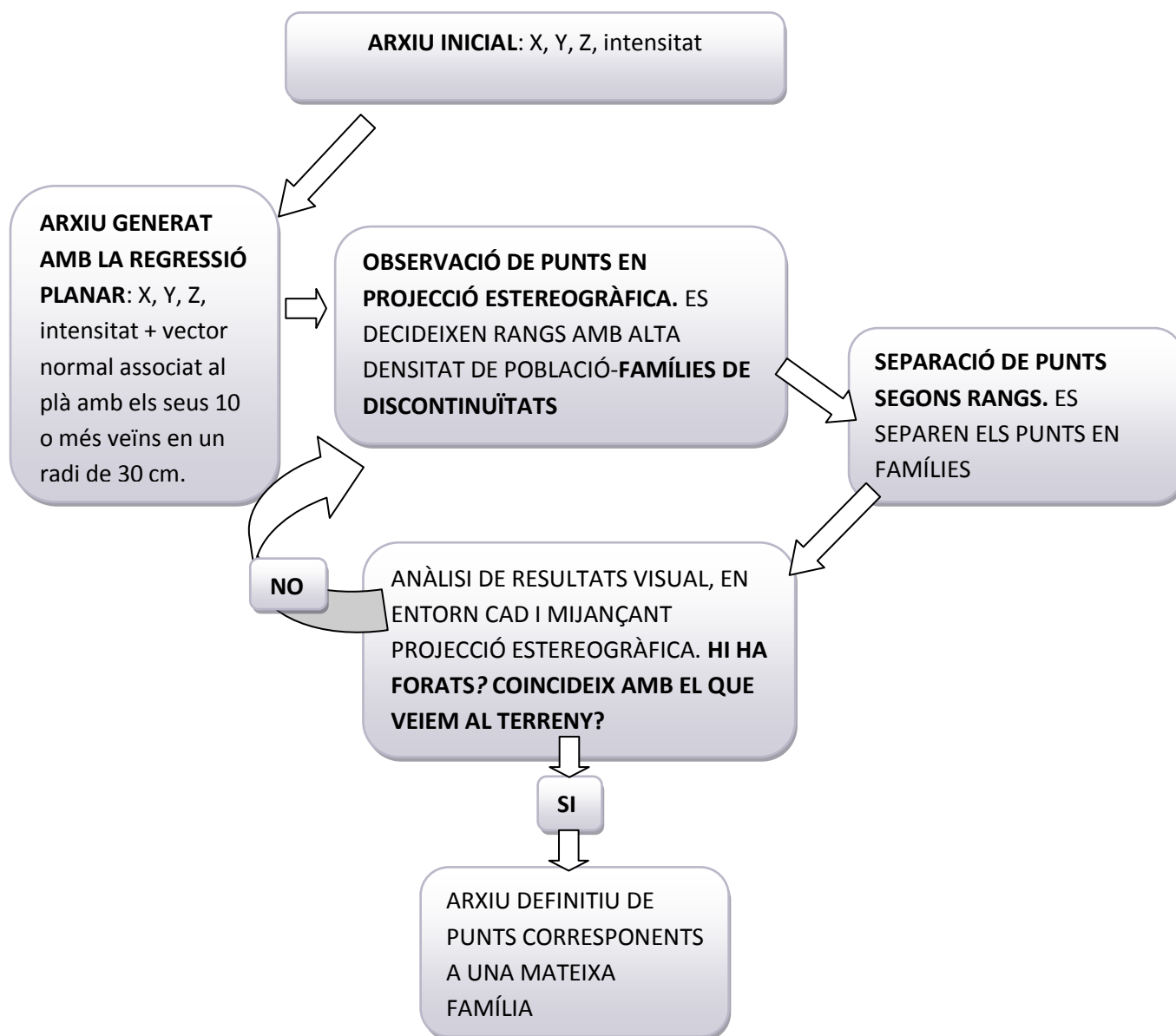


Figura 16. Esquema del procés establert per a separar les diferents famílies.

3.2.2 CÀLCUL D'ÀREES

Per tal de calcular les àrees dels plans que dibuixen aquest conjunt de punts, a causa de falta de programari accessible amb el qual treballar de forma automàtica en 3D, s'ha adoptat la solució de treballar amb l'abatiment sobre el pla horitzontal XY o bé la projecció d'aquests

punts sobre els plans horitzontals i verticals. Aquesta última solució és la que s'ha adoptat per defecte a totes les famílies Té l'avantatge de que comporta menys modificacions i intervencions manuals sobre l'arxiu d'origen. Aquest és un aspecte a considerar alhora de treballar amb molts arxius, ja que cada procés s'haurà de repetir molts cops. Als arxius que contenen plans molt propers, però, serà més precís fer-ne abatiments fins a col·locar-los horitzontals, ja que les projeccions no només afecten a una reducció de l'àrea real fins a una d'aparent, aspecte que es corregeix, sinó que també s'escurça l'espaiament entre aquestes àrees i això pot afectar a la transformació que es desenvolupa en el procés següent.

- a) Partim de l'arxiu de punts d'una de les famílies pertanyent a un dels sectors i l'importem a un CAD. Transformem les coordenades fent-hi una rotació de la línia de màxima pendent fins a l'horitzontal o bé una projecció sobre el pla XZ o YZ segons sigui més convenient, depenent de la disposició de les superfícies a l'espai. Hi ha una sèrie de consideracions a tenir en compte alhora de recuperar l'àrea real:

La relació entre les àrees en el pla de projecció i la real (figura 17) és la següent:

$$A' = A \cdot \cos \alpha$$

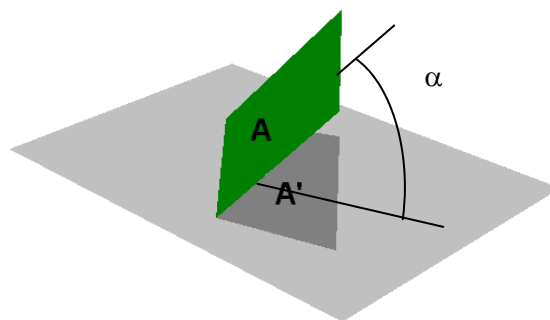


Figura 17. Relació entre les àrees real i projectada

Essent α l'angle entre el pla de projecció i el pla inclinat, A' l'àrea projectada i A l'àrea real. Els angles que coneixem respecte al pla inclinat són l'orientació mitja de la línia de màxima pendent (angle amb l'eix de les Y, segons el sistema de

coordenades utilitzat) i el cabussament mig per a cada família. Son els que utilitzarem per a desfer la projecció i aproximar l'àrea real, assumint-hi l'error causat per la dispersió d'orientacions i cabussaments que presenten aquestes famílies.

La relació que s'ha establert entre l'àrea del pla inclinat i el projectat, en cas de projectar sobre un dels plans verticals XZ ó YZ, és:

$$A' = A \cdot \cos(O_{mitg}) \cdot \cos(90 - C_{mitg})$$

Essent O_{mitg} l'angle horitzontal entre l'orientació mitja de cabussament i la normal al pla de projecció (XZ ó YZ) dels plans de la família al sector corresponent. C_{mitg} és l'angle de cabussament mig al sector corresponent. En cas de projectar sobre el pla horitzontal XY, només existeix angle vertical entre plans real i de projecció. En aquest cas, el terme referent a la rotació horitzontal desapareix i la relació entre les àrees queda:

$$A' = A \cdot \cos(C_{mitg})$$

- b) Mijançant l'ArcMap convertim l'arxiu de CAD a *feature class* de punts a partir de les opcions de l'eina *toolbox*. A partir d'ara els punts son projectats sobre el pla horitzontal i treballem en 2D.
- c) Amb la mateixa aplicació del *toolbox* fem *buffers* a 0.15 m per a cada punt. D'aquesta forma, com que els punts son separats 0.10m-0.15m aproximadament aconseguim que els punts coplanars quedin en *buffers* solapats.

Al fer aquesta operació, cal considerar un tipus de famílies de discontinuïtats que poden confondre'ns amb els resultats que generem, com ara zones planeres esglaonades per dues famílies amb un cabussament mést vertical (Les famílies de discontinuïtats F3 i F5 d'aquest estudi presenten aquesta dificultat). Fer un *buffer* en aquestes famílies en punts de plans diferents amb un reduït espaiat entre si podria provocar unió d'àrees no coplanars.

- d) Utilitzem ara l'opció *Dissolve* del *toolbox* per a que cada *buffer* al voltant de cada punt quedi formant un sol polígon amb els veïns amb que es solapa.
- e) Iniciem l'eina per a editar i explotem l'element creat amb l'opció *Dissolve*, de forma que se'ns individualitzen els polígons.

- f) Ara podem utilitzar l'opció *Calculate Areas* del *toolbox*, que ens permetrà obtenir un llistat de les àrees de cada un dels polígons creats que podrem exportar a una fulla de càlcul per al seu anàlisi estadístic.

4.RESULTATS

4.1. RESULTATS DEL TREBALL DE CAMP

S'han realitzat un total de 7 scanlines al llarg de la zona d'estudi, amb una longitud total de 72 metres aproximadament. A continuació es presenten els pols de les discontinuïtats interceptades en cada un d'ells (figura 18) i la distribució d'isodensitats (figura 19) mitjançant la projecció estereogràfica equiareal a l'hemisferi sud.

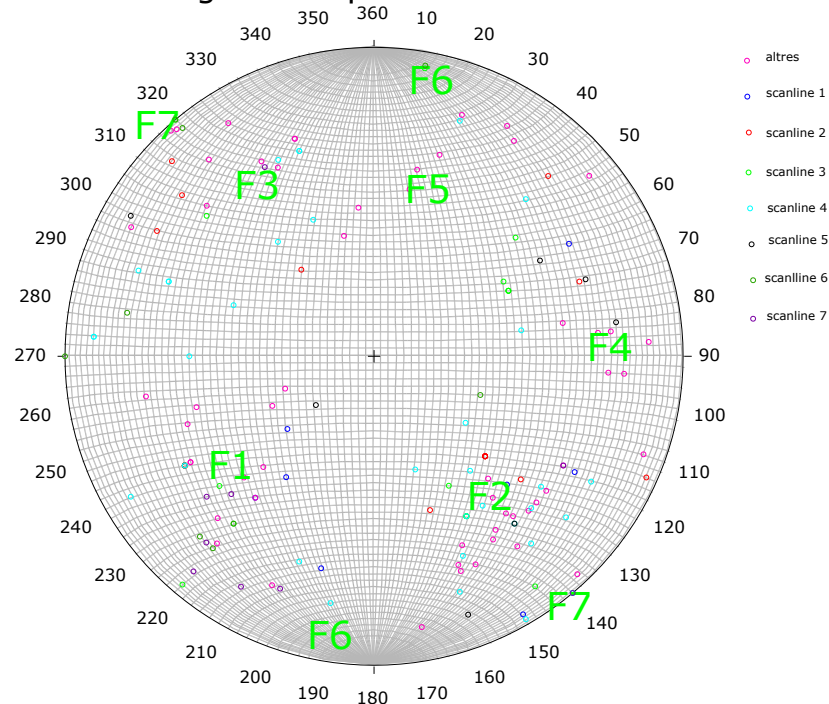


Figura 18. Pols de les discontinuïtats trobades al camp expressades en colors segons l'scanline on s'han interceptat. En verd, s'ha anotat el criteri per a establir una nomenclatura de les famílies diferenciades al camp per a tot l'estudi.

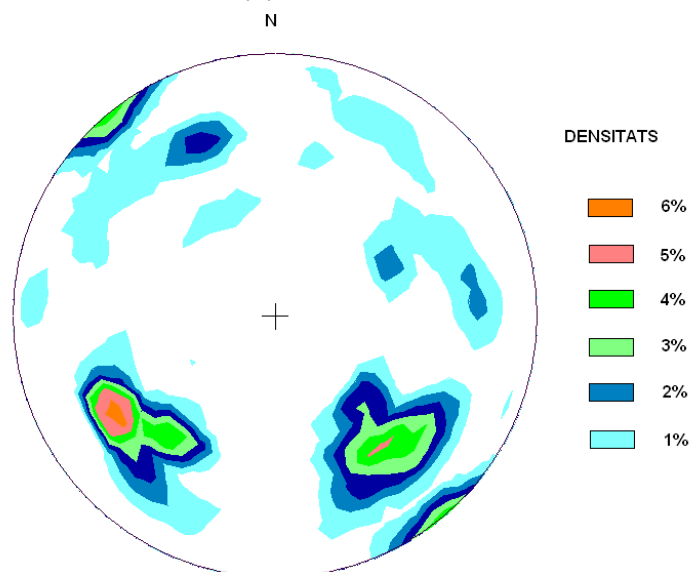


Fig 19. Distribució d'isodensitats de les dades anteriors.

S'han identificat un total de set famílies de discontinuïtats amb orientacions i cabussaments diferenciats. La següent taula en mostra una síntesi de l'anàlisi estadístic les dades numèriques obtingudes al camp:

NOM	ORIENTACIÓ DE LA LÍNIA DE MAXIMA PENDENT			PENDENT			LLARGÀRIA DE LA DISCONTINUÏTAT (m)			ESPAÏAT (m)		
	MIT	MÍN	MÀX	MIT	MÍN	MÀX	MIT	MÍN	MÀX	MIT	MÍN	MÀX
F1	50	30	90	67	40	90	23,21	1,1	100	3,41	0,4	10,3
F2	310	290	340	55	30	68	10,86	0,64	30,9	2,06	0,1	12
F3	146	130	160	52	30	60	4,02	0,3	10,8	8,35	0,7	16
F4	249	230	290	49	30	68	5,70	0,35	10,8	1,15	0,8	1,5
F5	-	170	225	35	20	65	-	-	-	-	-	-
F6	-	10	190	80	70	86	-	-	-	-	-	-
F7	-	140	321	82	70	90	11,43	0,10	32	1,68	0,10	6

Taula 4. Resultats de l'anàlisi estadístic de les propietats espacials de les diferents famílies al Solà d'Andorra. Els que no s'han pogut obtenir per falta de dades suficients s'han marcat amb un guió

L'índex de terminació de les discontinuïtats interceptades als *scanlines* és d'un 9.2%. Generalment, les discontinuïtats que acaben en roca intacta corresponen a diàclasi. A continuació un resum de les dades de les quals s'ha tret aquest índex.

TERMINACIÓ DE LES SEMITRACES			Suma
EN MATERIAL INTACTE	EN ALTRA DISCONTINUÏTAT	TAPADA/NO VISIBLE	
27	138	127	292
% índex de terminació			9,2

Taula 5. Dades resultants per a l'obtenció de l'índex de terminació

I a continuació, una taula de les característiques descriptives més rellevants de les superfícies i juntes observades al camp, :

NOM	MORFOLOGIA PLA DE DISCONTINUÏTAT	SUPERFÍCIE DE LA JUNTA	OBERTURA DE LA JUNTA (mm)			REBLERT DE LA JUNTA	ESTRÍES
			MIT	MÍN	MÀX		
F1	PLANA	LLISA	4	1	10	Si és tancada, presenta recristal·litzacions, si és oberta, presenta un reblert tou-argilós.	SI
F2	PLANA	RUGOSA	4	TANCADA	25	Si és oberta presena un reblert tou-argilós	SI
F3	ONDULADA	RUGOSA	19	10	25	Si és oberta presena un reblert tou-argilós	No
F4	PLANA	LLISA	3	TANCADA	10	Si és tancada, presenta recristal·litzacions, si és oberta, presenta un reblert tou-argilós.	SI
F5	ONDULADA	RUGOSA			25	Si és oberta presena un reblert tou-argilós	No
F6	IRREGULAR	RUGOSA	-	>1000	-	El reblert es presenta sovint com una zona milonitzada i als llavis de falla presenta estríes	SI
F7	ONDULADA	RUGOSA	17.20	1.00	25	Si és tancada, presenta recristal·litzacions, si és oberta, presenta un reblert tou-argilós.	No

Taula 6. Característiques descriptives de les diferents famílies de discontinuïtats trobades al camp.

A partir de les dades de llargària de la discontinuïtat, s'han estimat les àrees següents, suposant una persistència igual segons rumb i cabussament:

ÀREES (m ²)			
FAMÍLIA	MIT	MÍN	MÀX
F1	538,70	1,21	10000
F2	117,94	0,41	955
F3	16,16	0,09	117
F4	32,49	0,12	117
F5	-	-	-
F6	-	-	-
F7	131,56	0,01	1024

Taula 7. Estimació de les àrees que generarien discontinuïtats amb una persistència equivalent segons rumb i cabussament

4.1.1 CARACTERITZACIÓ DE LES FAMÍLIES DIFERENCIABLES AL CAMP:

F1: Aquesta família de discontinuïtats té una persistència molt elevada, de forma que arriba a formar vessants estructurals com el que forma el sector anomenat 2B en aquesta tesina, que coincideix amb la paret sud del canal del Forat Negre. La seva continuïtat sol ser major segons rumb. Al seus plans s'hi troben sovint recristal·litzacions que, en alguns casos, tenen estries orientades en direcció perpendicular a la horitzontal del pla (figura 21), es tracta d'una falla normal. Les superfícies que genera estan ben definides, planes i llises, amb la junta tancada, generalment. Es troba present a tota la zona d'estudi sense variar-ne cap de les característiques, excepte la grandària de les superfícies, que depèn sobretot de l'orientació del vessant que es consideri. Pel que fa a l'espaiament, aquest és sovint de menys d'un metre fins a pocs metres a tota la zona estudiada.

F2: La trobem a tota la zona d'estudi. Al vessant N del forat negre la trobem menys present en relació amb les altres famílies. Presenta juntes planes, bastant rugoses, en algunes juntes s'hi veuen recristal·litzacions, si són prou obertes hi ha reblert tot on s'hi desenvolupa vegetació (figura 20).



Figura 20: Gran obertura de la F2 a l'scanline nº 7.

F3 : Família de discontinuïtats molt ondulades i irregulars superficialment al correspondre's generalment amb la superfície d'erosió. És molt present a tots els *scanlines*. La trobem amb orientacions molt disperses a tota la zona a causa d'aquesta ondulació. Podria ser una família de diàclasi, formada per descompressió, ja que sovint varia paral·lelament a l'orientació i pendent del vessant.

F4: A partir de l'observació dels vessants que formen el Solà d'Andorra, s'aprecia com aquesta família té un paper morfològic rellevant als vessants situats més al E, que escapen de la zona d'estudi establerta. Com la F1, presenta superfícies molt planes i llises. La seva continuïtat en aquest sector és més limitada, però localment pot ser molt elevada. L'espaiament és de l'ordre d'un metre. Presenta una certa dispersió als diferents afloraments. Té caràcter de falla, als seus plans sovint s'hi aprecien estries, es tracta d'una falla normal conjugada amb la família F1. (figura 21)



Figura 21: Famílies de falles conjugades F4 i F1, al Roc de Sant Vicenç.

F5: Aquesta família la trobem molt poc al llarg dels *scanlines*. Molts cops per ser la superfície estructural on hem instal·lat l'*scanline*. Les superfícies son, igual com en la família 3, molt escolpides per la dinàmica de vessant, quedant aquestes superfícies ondulades rugoses (figura 22). S'ha relacionat aquesta família amb la família F6, es conclou que tenen orientacions i cabussaments propers, diferenciant-se només en que el grup corresponent a F5 son diàclasi, amb una representativitat molt elevada a tota la zona, mentre que el grup corresponent a F6 son falles que trobem majoritàriament a les zones més incidides.



Figura 22. Conjunt de plans de la F5 assenyalats, formant la superfície d'erosió, que es troba entretallada per altres famílies, sobretot F1 i F7 en aquest vessant a la part baixa de La Borrassica.

F6: Es tracta d'una falla. Hi trobem petits ($1-2 \text{ m}^2$) i nombrosos plans amb estries. La zona on la trobem està generalment molt milonititzada. Els cabussaments i orientacions son molt semblants, de vegades, als de la F5. Altres cops el cabussament és molt major. Això provoca que només es pugui diferenciar aquestes famílies observant-ne la superfície de la junta, segons hi hagi o no estries. Es troba amb espaiats molt grans, és una discontinuïtat situada generalment al llarg dels corredors E-W al Solà d'Andorra.



Figura 23: Estries en superfície de la família F6.

F7: És una família de falles que trobem de forma general a tota la zona d'estudi, les superfícies que forma en alguns sectors són molt irregulars, en altres es presenten més llises, en alguns casos s'hi ha trobat estries verticals.

4.1.2 RELACIONS ESTRUCTURALS

Al Solà de Santa Coloma s'hi han trobat tres grups diferenciats de discontinuïtats segons la seva tipologia i característiques estructurals, que en determinarà aspectes importants com la rugositat de les seves juntes i la disposició al vessant, així com les dimensions que poden assolir i les seves limitacions.

- El primer grup diferenciat és la família F6, amb unes característiques particulars que la diferencien de la resta de famílies de discontinuïtats. S'ha determinat, a partir de les observacions de camp, que es presenta al llarg dels corredors E-W. Sovint aquestes zones són molt fracturades i milonitzades, que a més es troben sovint molt erosionades. Les valls hi han incidit més en forma de canals que discorren en la seva direcció.

Les F5 i F6 pertanyen possiblement a una mateixa gènesi, presenten orientacions i cabussaments molt propers i això influirà en els resultats ja que és el criteri amb el qual es separen. Els plans de la F6 tenen caràcter de falla, ja que presenten estries, en canvi, els de la F5 tenen caràcter de diàclasi.

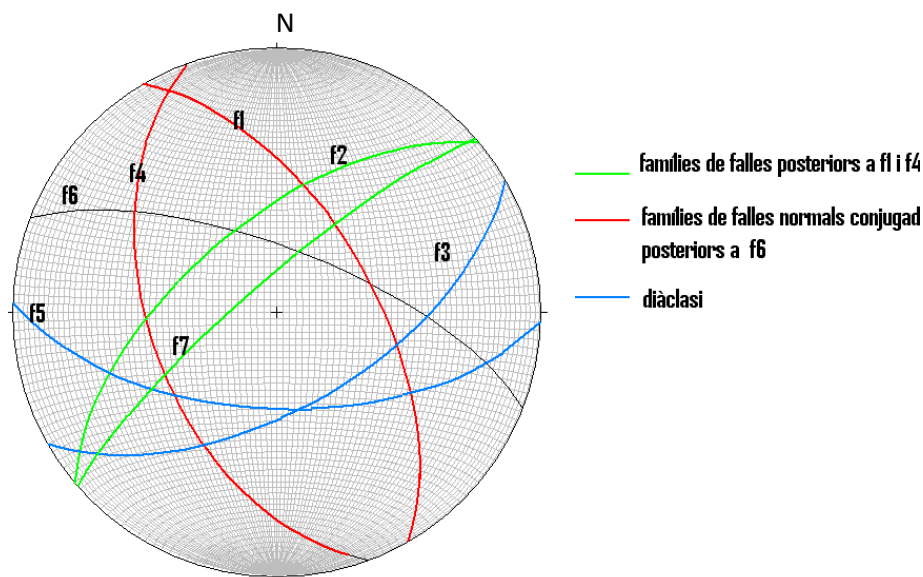
- Un segon grup de famílies amb característiques estructurals similars el formarien les famílies F3 i F5. Tenen unes distribucions al terreny molt generalitzades en els dos casos. En la majoria de sectors formen part de la superfície d'erosió formant superfícies molt irregulars i les de cabussament menor trobades al Solà de Santa Coloma. Això i el tipus de fractura generada, en molts casos de forma concoide, comporta una elevada dispersió de les dades analitzades mitjançant el *laserscanner*. Les superfícies que generen poden arribar a ser molt grans, però les diàclasi no es poden propagar per la matriu rocosa a través de fractures preexistents i, per tant, és un cas en el qual la grandària de les superfícies que trobem al massís no és un indicatiu de la continuïtat real d'aquestes famílies. De totes formes, sí que és un indicatiu de la possibilitat de

despreniments de gran magnitud, tot i fer-ho per una superfície més o menys esglaonada o irregular.

- El tercer grup de famílies de discontinuïtats el formen les famílies F1, F4, F2 i F7. Son famílies molt inclinades i en molts casos, verticals.

S'ha comprovat que aquest grup de famílies F7 i F2 es creua entre si i alhora limita la progressió de la continuïtat de les famílies dels altres grups.

Les relacions estructurals establertes a partir de les dades de camp porten a creure que la F6 i F5 es formarien anteriorment a les altres, ja que es troben fortament interrompudes per les demés discontinuïtats. Posteriorment, trobem la F1 i F4, falles normals conjugades, a les que se sobreposen les famílies F7 i F2. La F3 s'ha considerat com a diàclasi. Finalment la família F5 s'ha considerat com a diàclasi associada a F6. Les famílies F6, F5 i F3 queden interrompudes per les famílies F1 i F4, que alhora son interrompudes per F2 i F7. (Fig 25)



*Figura 25.
Relacions
estructurals entre
les famílies de
discontinuïtats.
Les famílies
situades més
amunt en la
llegenda, tallarien
a les de més
avall.*

4.2 ANÀLISI DE LES DADES GENERADES PER EL LASERSCANNER.

Com ja s'ha dit al capítol de metodologia, la zona d'estudi s'ha dividit en diferents sectors (Figura 26) que corresponen a vessants de pendent i orientació homogènies (Taula 8), anomenats de W a E: S1A, S1B, S2A, S2B, S3A, S3B:

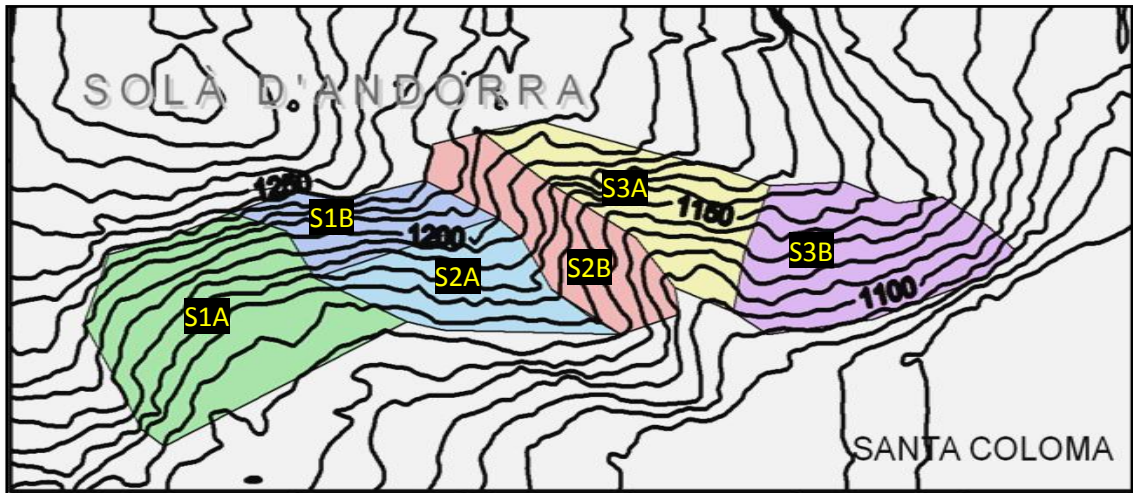


Figura 26. Zona d'estudi dividida en sectors que s'analitzaran aïlladament.

NOM VESSANT	DIRECCIÓ LÍNEA DE MÀXIMA PENDENT MITJA	PENDENT MIG
S1A	132	55
S1B	172	66
S2A	172	62
S2B	45	59
S3A	217	68
S3B	175	60

Taula 8. Orientació dels vessants que constitueixen els diferents sectors d'estudi.

Per a separar les famílies en arxius diferents i poder-les analitzar, cal conèixer els rangs entre els quals varien. Això s'ha estudiat en cada sector per separat. A continuació es presenten els resultats en la projecció estereogràfica equiareal, amb les densitats que presenten les normals dels punts de l'escaneig (s'ha extret una normal associada al pla que formaria cada punt amb els seus veïns,

mitjançant una regressió planar de 0.10 a 0.25 m de radi, i que les zones irregulars s'han eliminat, veure apartat de metodologia).

Els punts pertanyents a les diferents famílies es separen en grups. La distribució espacial resultant es presenta a continuació:

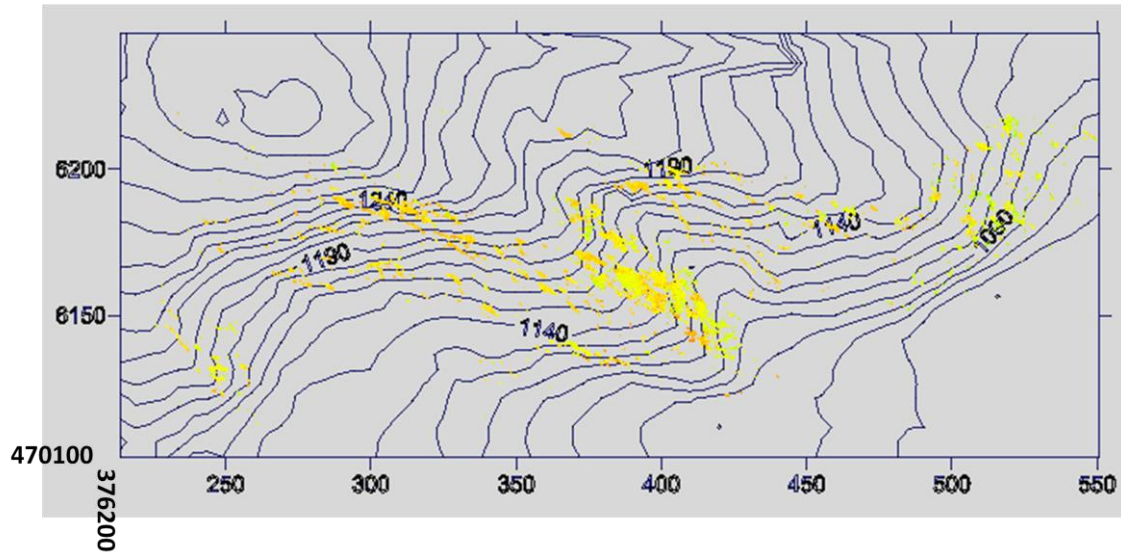


Figura 27. Distribució espacial de la família F1.

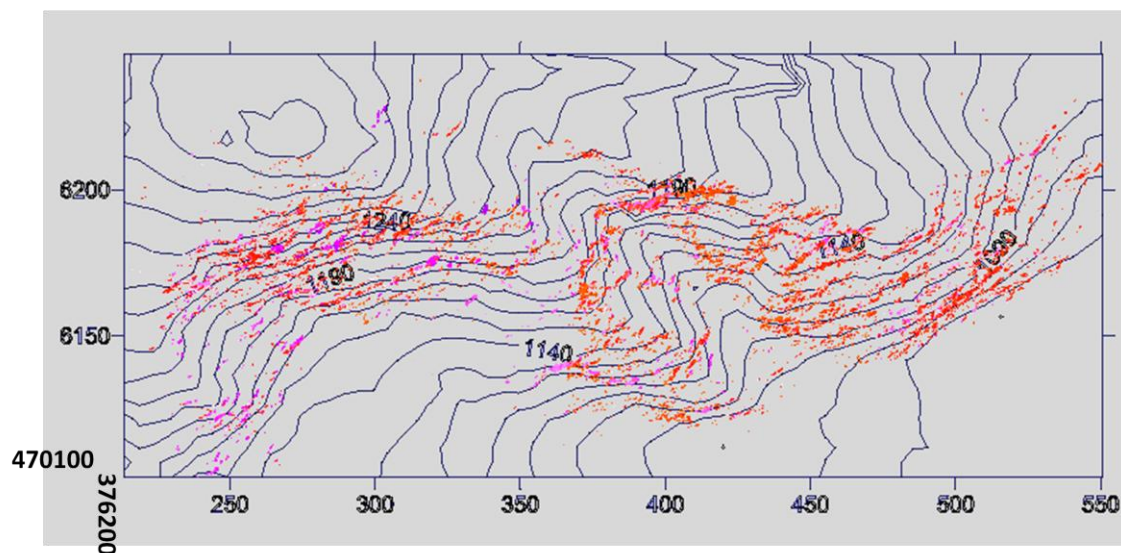


Figura 28. Distribució espacial de la família F2 en color magenta i F7 en color vermell. Les dues famílies es diferencien per el cabussament que presenten, molt més elevat per a la família F7.

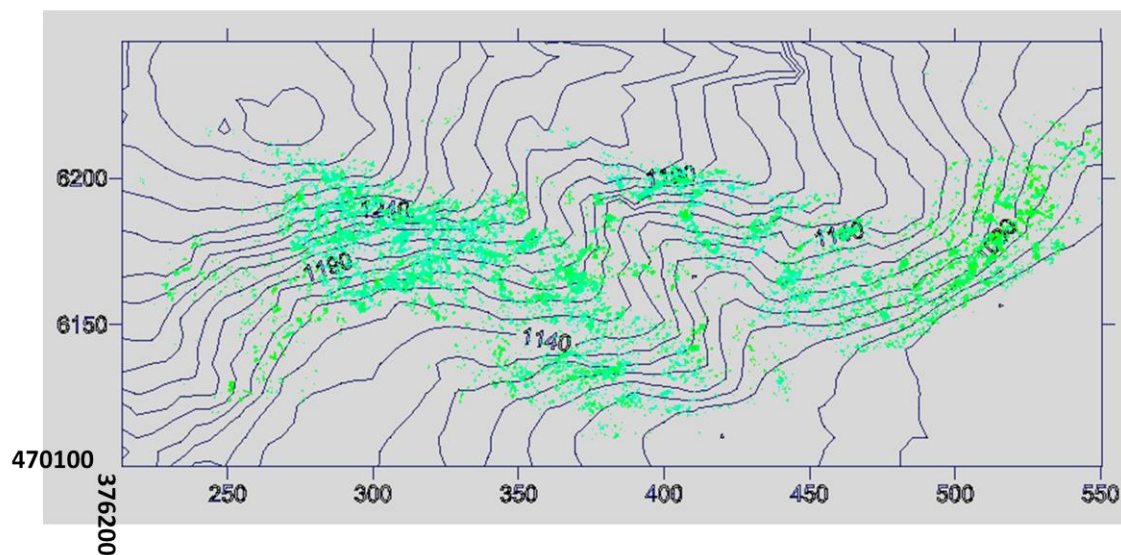


Figura 29. Distribució espacial de la família F3.

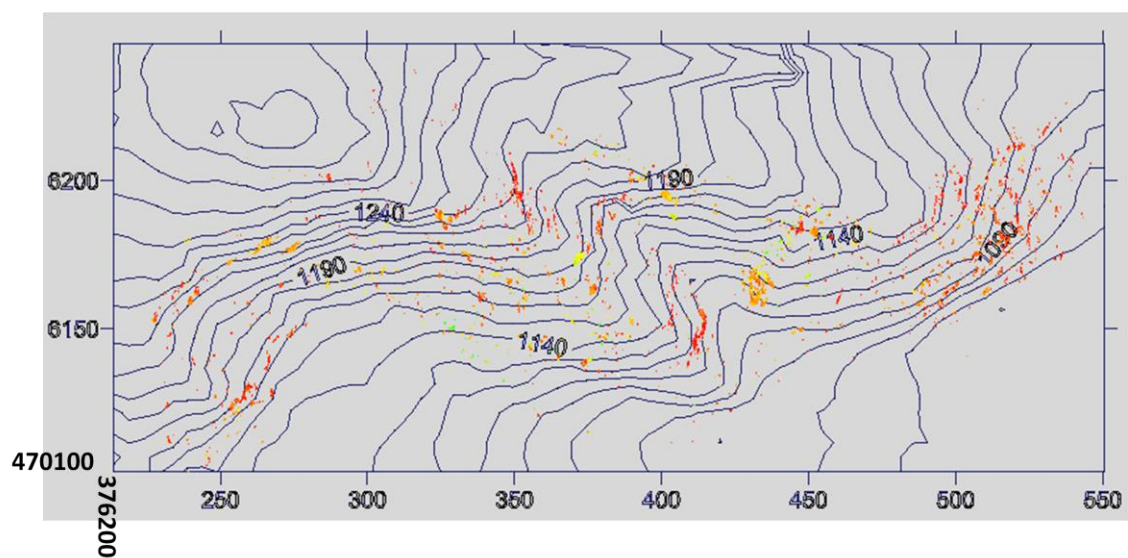


Figura 30. Distribució espacial de la família F4

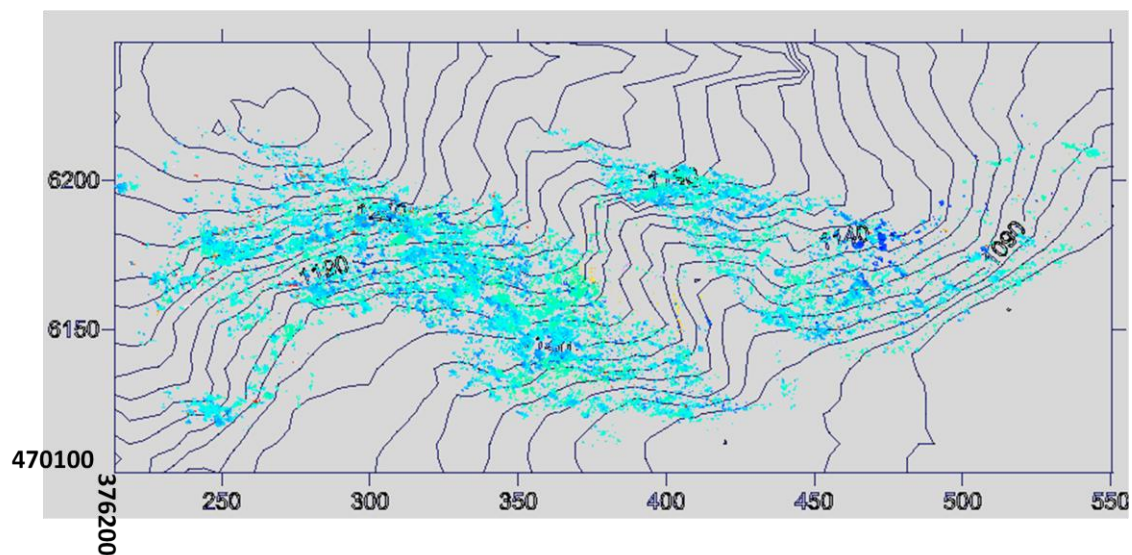


Figura 31. Distribució espacial de les famílies F5 i F6. Presenten orientacions similars, però el cabussament de la F6 normalment és superior al de la F5.

En l'anàlisi següent, en el qual els punts encara no s'han unit formant superfícies, es vol analitzar la representativitat de cada família a partir del nombre de punts que hi corresponen respecte al total.

DISTRIBUCIÓ DE PUNTS AMB NORMAL ASSOCIADA MITJANÇANT REGRESIÓ PLANAR

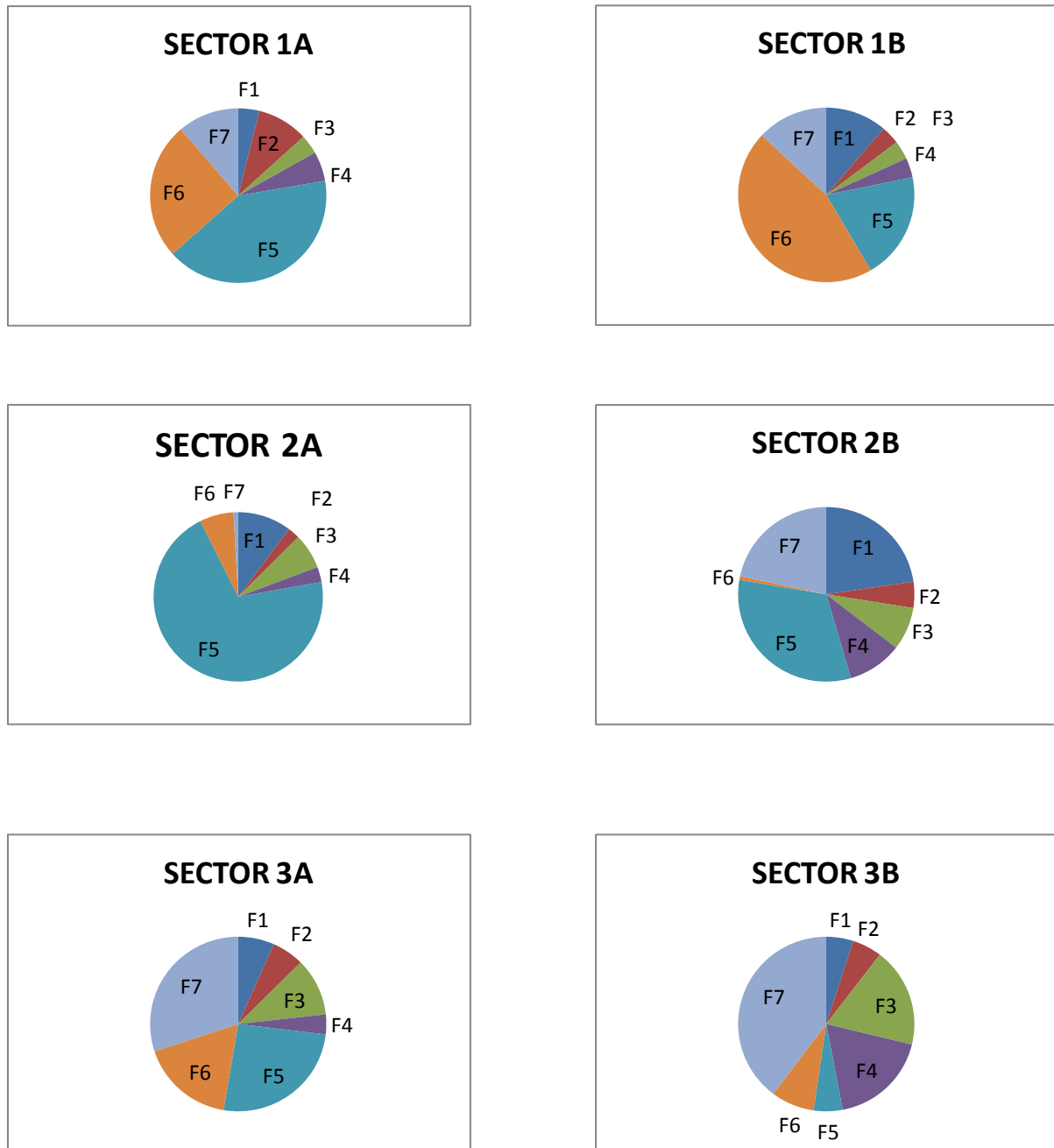


Figura 32. Relació de la representativitat relativa dels punts pertanyents a cada una de les famílies a cada un dels sectors.

A continuació s'exposen les dades numèriques de les orientacions mitges, mínimes i màximes, per a cada família de discontinuïtats, segons els sectors a que corresponen, juntament amb la projecció estereogràfica de la densitat de pols (esquerra) i els seus plans

mitjans (dreta), on s'hi inclou l'orientació mitjana del vessant, amb la finalitat d'analitzar l'estabilitat d'aquestes famílies als vessants. Les dades utilitzades per a fer aquestes projeccions estereogràfiques són una mostra representativa dels arxius de punts, amb informació de direcció de cabussament i cabussament, un cop feta la regressió planar i associar-hi la normal al pla al qual corresponen.

Per a analitzar les condicions de ruptura, s'utilitza el test de Marckland i cal considerar-hi les simplificacions següents:

-Les juntes són contínues i no tenen cohesió. Es produirà inestabilitat si la següent relació és inferior a la unitat:

$$\tan\Phi/\tan\beta < 1$$

on Φ és l'angle de fregament intern i β és el cabussament de la discontinuïtat, per al cas de ruptura planar, o bé de la lineació d'intersecció entre dues discontinuïtats per al cas de ruptura en tascons.

-L'angle de fricció considerat per a totes elles serà constant i de valor $\Phi=45^\circ$.

Si el pendent del vessant és φ , es produirà ruptura planar o en tascó si $\varphi > \beta > \Phi$ i l'orientació del vessant i el de la discontinuïtat o lineació entre dues discontinuïtats que afloren al talús són aproximadament paral·leles, on s'ha permès una tolerància de $\pm 30^\circ$ donades les irregularitats possibles del vessant i dispersió de les discontinuïtats. Alhora també s'han considerat possibles variacions en el pendent de les discontinuïtats.

Si existeixen discontinuïtats molt verticals cabussant cap a l'interior del talús, es considerarà que hi ha possibilitat de ruptura per bolcada si el pol d'aquesta discontinuïtat cau en direcció paral·lela al vessant $\pm 30^\circ$ i $\beta - \Phi$ és superior a la inclinació d'aquest pol.

SECTOR 1A

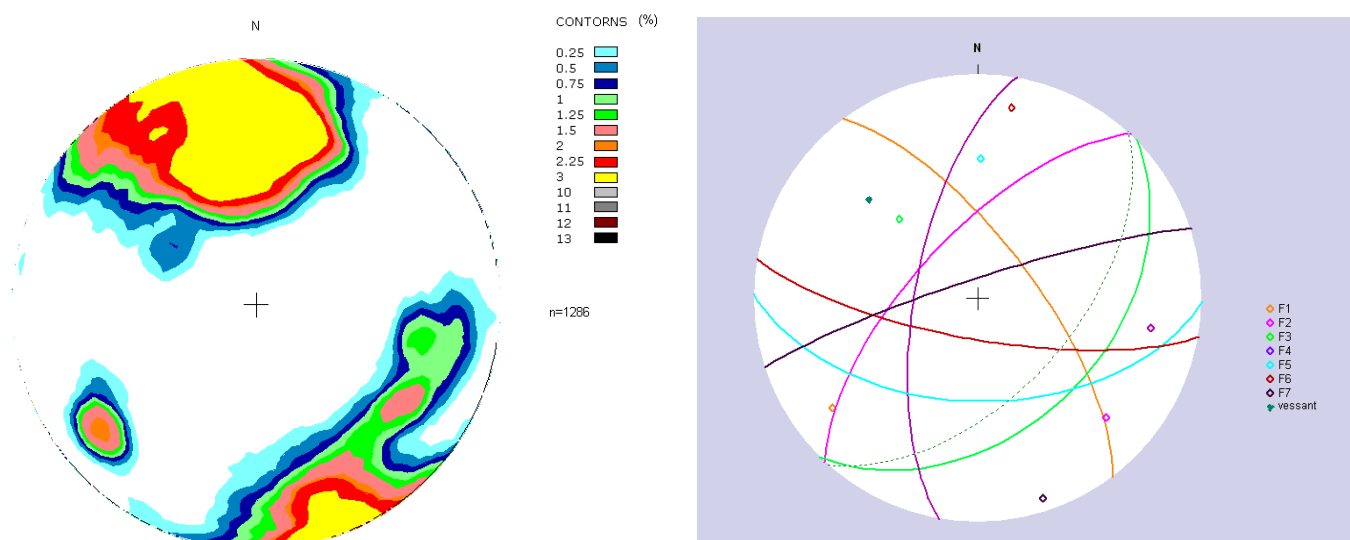


Figura 33. A l'esquerra, isodensitats per a les famílies del sector 1A extretes a partir de les dades del laserscanner. A la dreta, representació dels plans mitjos juntament amb el pendent del vessant (línea discontinua).

FAMÍLIA	DIRECCIÓ DE CABUSSAMENT			CABUSSAMENT		
	MITJANA	MÍNIMA	MÀXIMA	MITJÀ	MÍNIM	MÀXIM
F1	53	40	80	70	55	80
F2	313	290	330	67	40	85
F3	135	115	150	41	20	50
F4	280	255	295	67	45	85
F5	181	160	216	52	30	65
F6	190	0	360	75	55	90
F7	342	325	360	83	75	90
Vessant	132			55		

Taula 9. Resum de dades mitjanes, mínimes i màximes de cabussament i orientació de les famílies i orientació i pendent del vessant al sector 1A.

Anàlisi

Al sector 1A, la major concentració de punts la tenen les famílies F3, F5, F6 i F7. L'orientació mitjana del vessant presenta una tendència cap a les orientacions de la família 3. A grans trets, i considerant la dispersió tant de l'orientació i cabussament de les famílies com la irregularitat de la superfície del vessant, es presenta la possibilitat que aquesta desenvolupi ruptures planars, com també la F5. Hi ha també la possibilitat de ruptura en tascó entre les famílies F1 i f6 i F3-F5. Finalment, F7 presenta la possibilitat de ruptura en bolcada.

SECTOR 1B

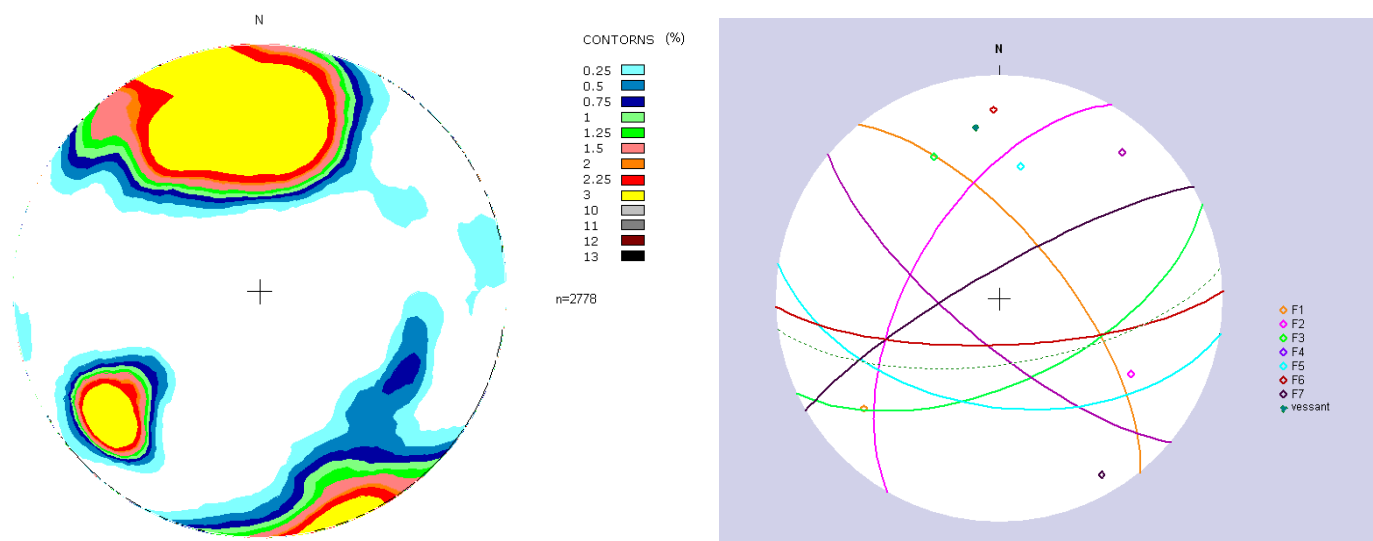


Figura 34. A l'esquerra, isodensitats per a les famílies del sector 1B extretes a partir de les dades del laserscanner. A la dreta, representació dels plans mitjos juntament amb el pendent del vessant (línea discontinua).

FAMÍLIA	DIRECCIÓ DE CABUSSAMENT			CABUSSAMENT		
	MITJÀ	MÍNIMA	MÀXIMA	MITJÀ	MÍNIM	MÀXIM
F1	51	35	80	67	40	90
F2	300	270	320	57	40	70
F3	155	110	170	59	30	75
F4	220	70	280	74	40	90
F5	189	175	225	50	30	60
F6	178	0	360	73	60	90
F7	330	120	340	80	65	90
Vessant	172			66		

Taula 10. Resum de dades mitjanes, mínimes i màximes de cabussament i orientació de les famílies i orientació i pendent del vessant al sector 1B.

Anàlisi

En aquest sector, hi ha una concentració elevada de punts de totes les famílies, excepte les famílies F3, F4 i F2. L'orientació mitja del vessant presenta una tendència cap a l'orientació de la família F5. Es poden desenvolupar ruptures planars i en tascó per a les famílies F3 i F5, en tascó per a les famílies F3 amb F4 i trencada per bolcada en la família F7.

SECTOR 2A

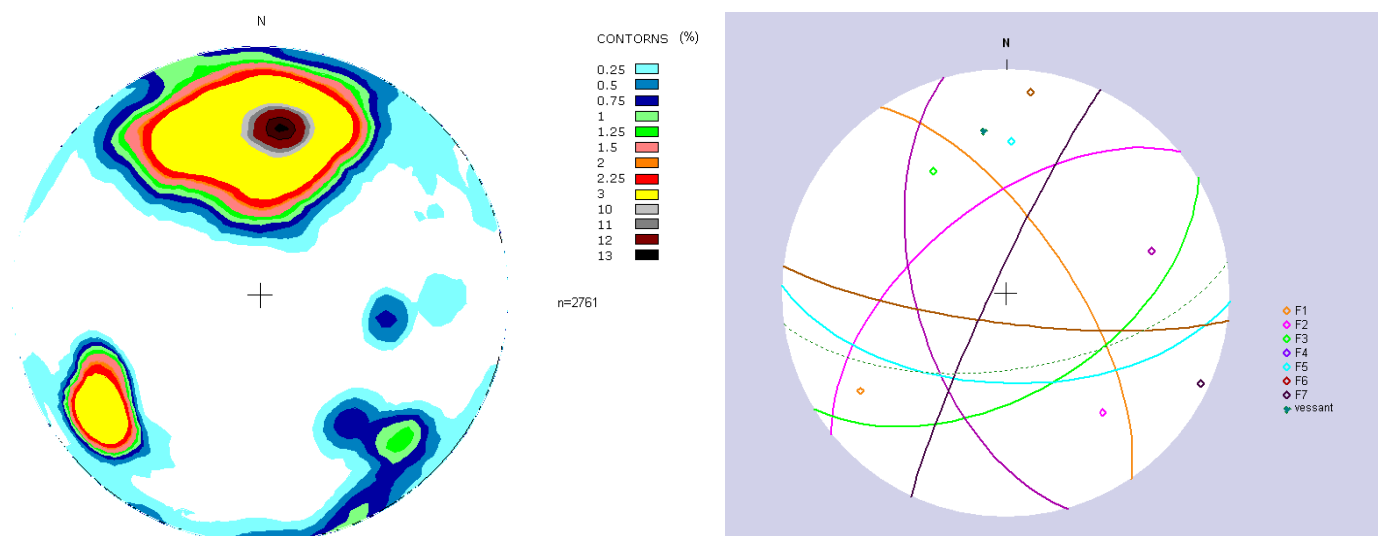


Figura 35. A l'esquerra, isodensitats per a les famílies del sector 2A extretes a partir de les dades del laserscanner. A la dreta, representació dels plans mitjos juntament amb el pendent del vessant (línea discontinua).

FAMÍLIA	DIRECCIÓ DE CABUSSAMENT			CABUSSAMENT		
	MITJÀ	MÍNIMA	MÀXIMA	MITJÀ	MÍNIM	MÀXIM
F1	51	35	80	67	40	90
F2	300	270	320	57	40	70
F3	155	110	170	59	30	75
F4	220	70	280	74	40	90
F5	189	175	225	50	30	60
F6	178	0	360	73	60	90
F7	330	120	340	80	65	90
Vessant	172			62		

Taula 11. Resum de dades mitjanes, mínimes i màximes de cabussament i orientació de les famílies i orientació i pendent del vessant al sector 2A.

Anàlisi

Destaca en aquest sector la densitat de punts de la F5, molt elevada respecte la resta de famílies. Les famílies F1 i F3 també presenten elevades densitats. L'orientació del vessant és molt semblant a les famílies F5 i F3. Hi ha indicis de ruptures planars per les famílies F3 i F5 que presenten també ruptures possibles en tascó, com F3 i F4.

SECTOR 2B

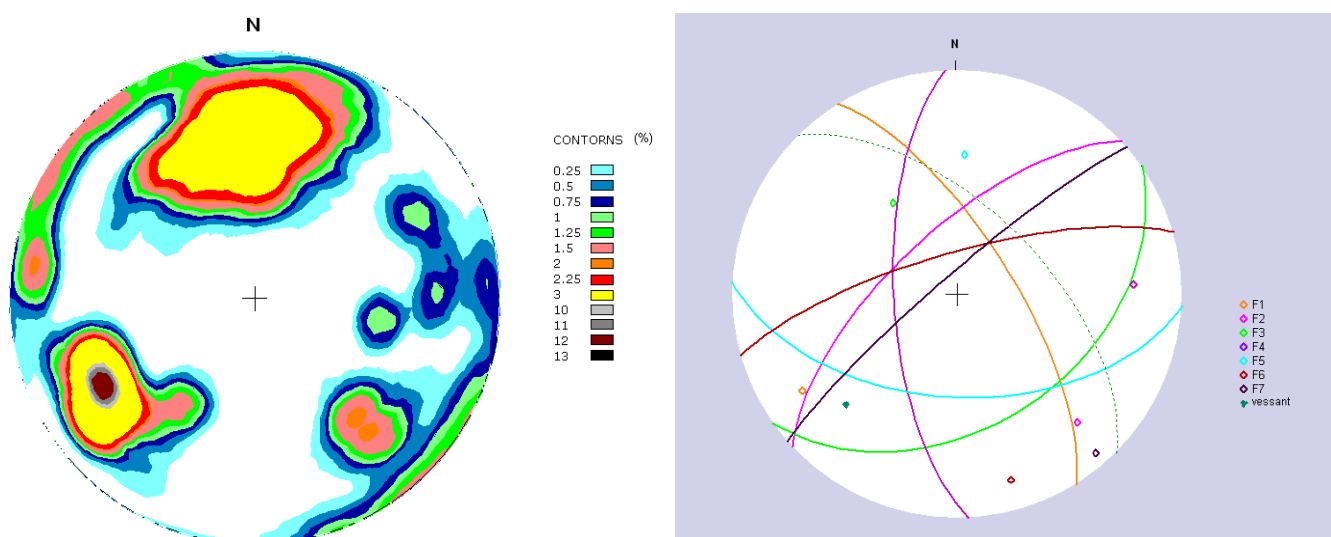


Figura 36. A l'esquerra, isodensitats per a les famílies del sector 2B extretes a partir de les dades del laserscanner. A la dreta, representació dels plans mitjos juntament amb el pendent del vessant (línea discontinua).

FAMÍLIA	DIRECCIÓ DE CABUSSAMENT			CABUSSAMENT		
	MITG	MÍNIMA	MÀXIMA	MITG	MÍNIM	MÀXIM
F1	58	30	80	70	55	80
F2	317	290	330	67	40	85
F3	145	110	150	41	20	50
F4	267	90	295	67	45	85
F5	183	160	216	52	30	65
F6	344	335	360	75	55	90
F7	319	120	360	83	75	90
Vessant	56	59				

Taula 12. Resum de dades mitjanes, mínimes i màximes de cabussament i orientació de les famílies i orientació i pendent del vessant al sector 2B.

Anàlisi

Destaca en aquest sector l'elevada densitat de les famílies F1, F5 i F3; de major a menor. La F7 presenta una elevada dispersió d'orientacions. El vessant tendeix a l'orientació i pendent de la F1, la qual pot desenvolupar ruptures planars amb cabussaments baixos i considerant les irregularitats del vessant.

SECTOR 3A

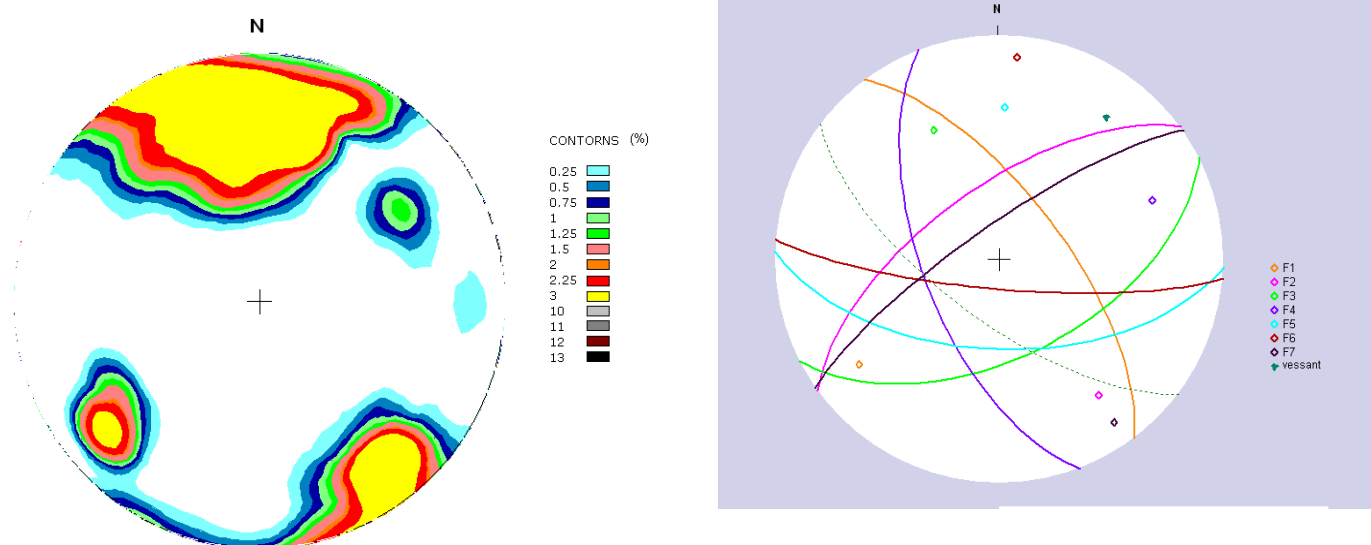


Figura 37. A l'esquerra, isodensitats per a les famílies del sector 3A extretes a partir de les dades del laserscanner. A la dreta, representació dels plans mitjos juntament amb el pendent del vessant (línea discontinua).

FAMÍLIA	DIRECCIÓ DE CABUSSAMENT			CABUSSAMENT		
	MITJANA	MÍNIMA	MÀXIMA	MITJÀ	MÍNIM	MÀXIM
F1	53	40	80	67	50	80
F2	324	290	350	64	40	70
F3	153	110	170	54	25	65
F4	249	230	295	62	30	90
F5	182	160	200	57	30	70
F6	185	0	360	79	70	90
F7	325	115	350	78	65	90
Vessant	217			68		

Taula 13. Resum de dades mitjanes, mínimes i màximes de cabussament i orientació de les famílies i orientació i pendent del vessant al sector 3A.

Anàlisi

Totes les famílies presenten una alta densitat de pols, excepte la F4, menys present. L'orientació del vessant és propera al pla mig entre F4 i F6. F4 i F5 poden desenvolupar trencades planars. Altres ruptures possibles serien en tascó entre les famílies F4 amb F3 i F5.

SECTOR 3B

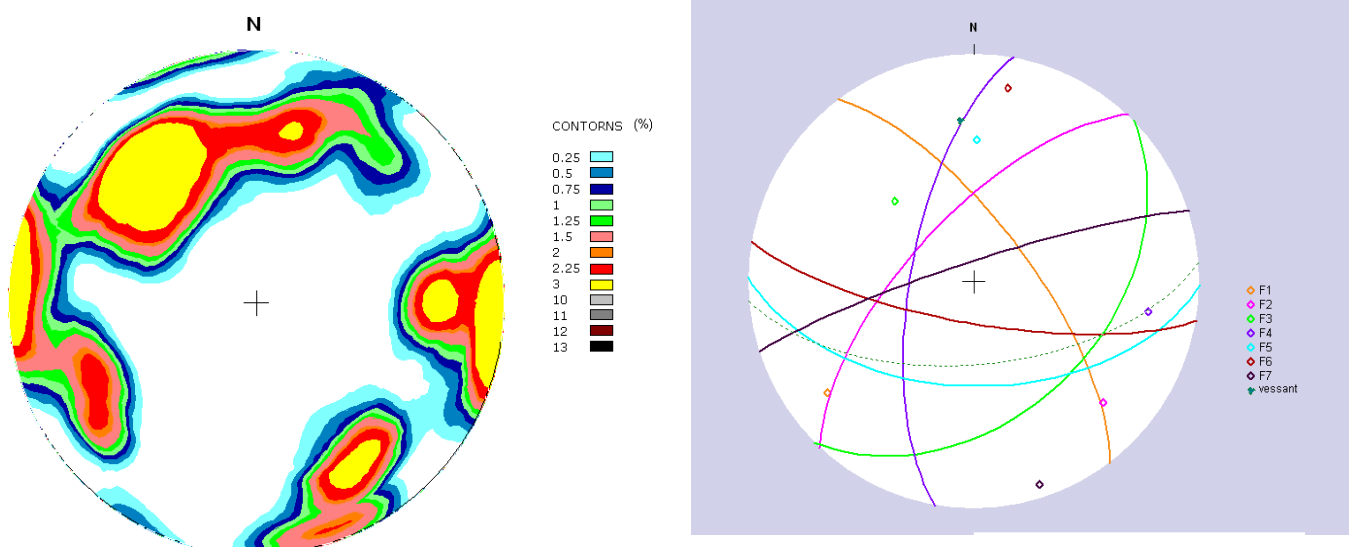


Figura 38. A l'esquerra, isodensitats per a les famílies del sector 3B extretes a partir de les dades del laserscanner. A la dreta, representació dels plans mitjos juntament amb el pendent del vessant (línea discontinua).

FAMÍLIA	DIRECCIÓ DE CABUSSAMENT			CABUSSAMENT		
	MITJANA	MÍNIMA	MÀXIMA	MITJÀ	MÍNIM	MÀXIM
F1	53	40	80	70	55	80
F2	313	290	330	67	40	85
F3	135	115	150	41	20	50
F4	280	255	295	67	45	85
F5	181	160	216	52	30	65
F6	190	0	360	75	55	90
F7	342	325	360	83	75	90
Vessant	175	60				

Taula 14. Resum de dades mitjanes, mínimes i màximes de cabussament i orientació de les famílies i orientació i pendent del vessant al sector 3B.

Anàlisi

El que diferencia aquest vessant dels anteriors és la baixa densitat de punts i menor dispersió de la F5 i la major dispersió i major densitat de punts de la F1.

Aquest vessant, com els sectors 1B i 2A, també té una orientació i pendents propers a la F5, que presenta possibilitat de generar ruptures planars, així com hi està propera F3. La F7 podria presentar ruptura per bolcada.

Un cop separats els punts segons les famílies a les quals corresponen, s'han introduït al programa *ArcGis* d'*ESRI* amb el qual s'han unit els punts en polígons mitjançant *buffers* a 0.15 m. Com ja s'ha comentat a l'apartat de metodologia, realment els punts no els introduïm a l'*ArcGis* en 3 dimensions sinó que els projectem sobre el pla horitzontal o vertical o bé en fem una rotació, segons sigui més convenient. S'han generat llistats de les àrees d'aquests polígons i s'han exportat a una fulla de càlcul per tal de corregir-les (desfem la projecció) o analitzar-les en cas d'haver-les generat mitjançant rotacions (famílies F3, F5 i F6). S'han dibuixat histogrames de la freqüència dels diferents valors d'aquestes àrees (Annex I als resultats). A continuació es presenta una taula resumint els valors mitjos i màxims.

VALORS D'ÀREES MITJANES I MÀXIMES (m ²)												
	S1A		S1B		S2A		S2B		S3A		S3B	
	MITJA	MAX	MITJA	MAX	MITJA	MAX	MITJA	MAX	MITJA	MAX	MITJA	MAX
F1	0.5	6.1	0.4	4.5	0.4	9.6	1.3	108.0	0.7	24.4	0.7	11.3
F2	0.5	9.6	0.3	7.6	0.7	11.7	0.5	3.4	1.2	32.3	0.6	10.8
F3	0.3	3.2	0.7	41.6	0.7	23.0	0.4	15.9	0.5	13.5	0.5	11.6
F4	0.5	3.7	0.4	3.8	0.8	8.7	0.9	14.1	0.6	20.2	0.6	12.9
F5	0.7	38.2	0.5	24.0	1.0	53.9	0.5	11.8	0.6	29.9	0.4	20.3
F6	0.5	3.2	0.6	31.8	0.4	6.6	0.3	1.6	0.4	14.5	0.8	15.7
F7	0.4	4.0	0.5	16.6	0.5	2.9	0.8	8.9	0.7	39.1	0.8	39.0

Taula 15. Valors d'àrees mitjanes i màximes als diferents sectors.

Per les famílies que desenvolupen ruptures de tipus planar, les àrees també s'han analitzat representant-ne la distribució de la freqüència acumulada de valors en que apareixen les diferents àrees. S'han representat les àrees des de la màxima en cada sector fins a 0.1 m². Aquests gràfics s'han representat sobre eixos logarítmics i se n'ha extret una línia de regressió de tipus potencial en tots els casos, ja que és la funció que millor s'hi ajusta. Els paràmetres que defineixen aquesta línia s'han anomenat paràmetres A i b, com s'ha fet en altres treballs anteriors (Hungry et al., 1999; Rousseau., 1999; Dussauge et al., 2001) i corresponen a l'equació:

$$\text{Freqüència} = A (\text{magnitud})^{-b}$$

A l'annex II als resultats es presenten els gràfics corresponents a les famílies que poden presentar ruptura planar a cada vessant per separat i la gràfica corresponent a la suma de la freqüència acumulada de les àrees majors als mateixos valors exposats abans en cada vessant.

Els paràmetres A i b, els seus valors mitjos i la desviació per a les famílies desencadenants de trencades en cada sector es presenten a la taula 16.

Valors del paràmetre <i>b</i>					
	F1	F3	F4	F5	suma
1A		1.2		1.04	1.13
1B		1.35		1.34	1.41
2A		1.27		1.04	1.1
2B	0.95				0.95
3A			1.17	1.19	1.18
3B		1.33	1.25		1.4
Mitjana					1.2
Desviació					0.2

Taula 16. Valors del paràmetre b de la recta de regressió aproximada de la representació sobre els eixos logarítmics, de les dades de freqüència acumulada, ordenada segons magnituds creixents, per a les discontinuïtats susceptibles de generar trencades planars i de la seva suma als diferents sectors.

4.3 CONSIDERACIONS FINALS:

4.3.1 RELACIÓ DE LA CONTINUÏTAT DE LES JUNTES EN LA MAGNITUD DELS DESPRENIMENTS I LLISCAMENTS ROCÓSOS.

Al Solà de Santa Coloma s'hi han trobat tres grups diferenciats de discontinuïtats segons la seva tipologia, que en determinarà aspectes importants sobre la rugositat de les seves juntes, la disposició al vessant, les dimensions que poden assolir, les seves limitacions i alhora, el tipus de ruptura. Aquestes s'ajunten ara en grups segons les relacions estructurals trobades i les seves limitacions en la continuïtat. Així existeix un grup de famílies contínues F2, i F7 que interrompen sistemàticament als l'altres, format per les famílies de falles F1 i F4 i F6 i de diàclasi F3, i F5.

Una família de discontinuïtats es pot creuar amb altres famílies de discontinuïtats sense que es produeixi un desplaçament o aquest no sigui suficient per a evitar la individualització en conjunt. De totes formes, el volum rocós individualitzat queda dividit en blocs menors, això fa possible considerar-ne la possibilitat que se'n produeixi un desmantellament progressiu.

Per a les juntes presents al Solà d'Andorra la Vella es presenta una gama molt variada de casos possibles entre els següents casos extrems:

- Trencament en conjunt a partir d'una superfície. Això en suposa una magnitud màxima de despreniment rocós amb freqüència mínima (un sol esdeveniment).
- Trencament gradual de cada un dels blocs menors en que es divideix el bloc conjunt individualitzat. Això suposa la freqüència màxima per a unes mínimes magnituds possibles en les quals es divideix el bloc.

La tendència de cada una de les famílies a generar àrees majors o menors indicarà en quina mesura es tendeix a un o altre cas exposat i de quina forma la limitació de la continuïtat de les diferents famílies té un paper en la magnitud del despreniment rocós.

Els resultats de l'anàlisi d'estabilitat de les famílies als vessants indiquen que les ruptures majoritàries son planars, i se n'han detectat superfícies amb grandàries considerables. Poden haver-se ajuntat superfícies no coplanars que es trobin amb un espaiat de l'ordre de

0.15 m, ja que escapa de la precisió de la metodologia utilitzada, i que s'agreuja davant l'elevada irregularitat que presenten aquestes superfícies. Aquest poc desplaçament relatiu de les superfícies porta a la possibilitat de considerar una ruptura de forma esglaonada inestable, en major mesura com menor sigui aquest esglaonament. En aquest cas, la poca continuïtat d'aquestes famílies no sempre limita la magnitud dels desprendiments i lliscaments rocosos si aquestes es van rellevant formant un conjunt esglaonat. La Taula 16 demostra que aquestes famílies generen superfícies amb àrees considerables tot i la seva limitada continuïtat a petita escala. Aquestes famílies, independentment de la grandària màxima de les superfícies assolides, presenten una freqüència molt elevada d'aparició als vessants (Veure Annex I als resultats). De totes formes, no se n'han trobat àrees majors a 50m^2 , amb el qual es creu que existeix una limitació de la seva continuïtat a gran escala.

D'altra banda, si analitzem les famílies més contínues: F1, F2, F4 i F7, s'observa que una continuïtat gran no influeix considerablement en un augment de la magnitud dels desprendiments rocosos si aquestes discontinuïtats es disposen de forma estable respecte a l'orientació del vessant. D'altra banda, en els casos en que es troben de forma desfavorable arriben a desenvolupar àrees més grans, en alguns casos de les majors trobades a tota la zona d'estudi (cas de la F1 al S1B: 100m^2).

Aquest grup de discontinuïtats més vertical presenta, en molts casos, la possibilitat de ruptura en bolcada a la zona d'estudi. En aquest tipus de ruptura, la magnitud del desprendiment serà major com major sigui la continuïtat de la junta que individualitza el volum respecte al vessant.

Al solà de Santa Coloma hi ha possibilitats de ruptura per bolcada que involucren famílies amb una continuïtat elevada. Presenten possibilitat de ruptura per bolcada les famílies de discontinuïtats la família F7 als sectors 1A, 1B i 3B.

4.3.2 PRECISIÓ EN LA DETERMINACIÓ DE LES DIFERENTS FAMÍLIES I DEL CÀLCUL D'ÀREES A PARTIR DE LA METODOLOGIA UTILITZADA.

El treball de camp realitzat al Solà d'Andorra ens apropa a un coneixement i caracterització de les juntes del vessant rocós. Cal trobar un nombre superior a 30 individus de la mateixa família per a

que aquest sigui suficientment representatiu de les seves dades de longitud de traça i espaïament. Interceptar un nombre de cops suficient les famílies F5 i F6, implica realitzar *scanlines* molt vertical o prou llarg. Això ha estat impracticable al Solà d'Andorra, i per tant, el nombre de discontinuïtats mesurades al camp d'aquestes famílies no és suficientment representatiu.

S'han estimat les àrees resultants de la continuïtat estreta a partir de les dades de camp i aquestes últimes son molt més altes. La causa principal d'aquesta exageració és la suposició que aquestes famílies tenen igual continuïtat segons rumb i cabussament.

Analitzant la forma de les àrees que es generen a partir de l'estudi mitjançant el *laserscanner*, es pot comprovar que això no és cert. Una família de discontinuïtats pot ser molt persistent segons una de les direccions (rumb o cabussament) i alhora quedar més limitada en l'altra. Per a il·lustrar-ho es pot observar la forma de les àrees generades per la família F1, que és la que dona resultats majors. Es pot comprovar com la seva continuïtat segons rumb és molt superior a la que té segons cabussament (Figura 40).

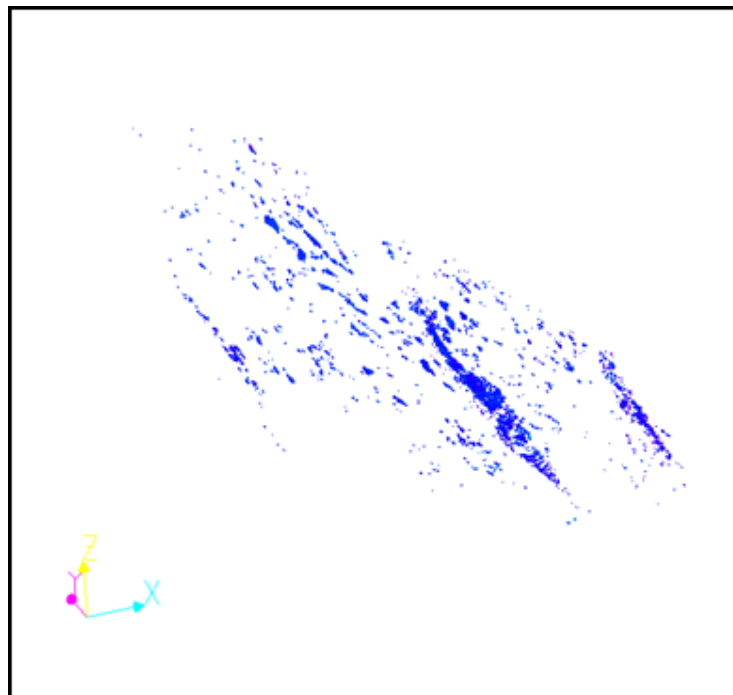


Figura 40. Distribució de la família 1 a la zona estudiada; Y= nord, X= E, Z=eix vertical, la continuïtat que presenta segons rumb és molt superior a la que presenta segons cabussament

Existeixen dades, però, que només es poden obtenir de forma manual, com la presència i mesura d'estries als plans de discontinuïtat, l'obertura i el reblert de la junta, la rugositat a petita

escala, les relacions temporals i indicis de falles conjugades, el tipus de pla (falla, diàclasi, estratificació...) o l'índex de terminació.

El *laserscanner*, d'altra banda, permet cobrir tota la zona a analitzar en molt poc temps. Necessita un tractament exhaustiu de les dades i comprovar els resultats al camp per a entendre i obtenir els resultats i la seva possible falta de precisió. Per a l'estudi de les discontinuïtats presents al terreny és necessari *software* específic que no és d'ús comú i de difícil accés avui en dia, alhora de requerir computadores suficientment potents, depenent de la grandària de la zona a estudiar, que condiciona el volum dels arxius generats.

És molt important l'estudi *in situ* de la superfície a escanejar i els elements que hi volem estudiar. Per a l'estudi de les discontinuïtats, formades per cares més o menys planes, és molt adequat l'ús del *laserscanner*. Si aquestes cares presenten moltes irregularitats, ja sigui per que la zona està molt erosionada i meteoritzada o per la curvatura de les discontinuïtats, serà molt més difícil i inclús impossible de separar famílies de discontinuïtats, essent necessària molta intervenció manual per a ajustar els paràmetres de filtrat. Contràriament, és del tot avantatjós en zones amb plans ben definits que contrasten bé amb la resta de la superfície, en aquest cas quasi el treball de camp és mínim.

Amb el treball amb *laserscanner* s'han detectat la majoria de les famílies de discontinuïtats sense problema. Les discontinuïtats que presenten orientacions i cabussaments propers i alta dispersió, queden parcialment solapades a la projecció estereogràfica, produint repeticions d'aquells punts inclosos a rangs de direcció i cabussament solapats entre dues famílies de discontinuïtats.

Això succeeix amb les famílies presents al Solà d'Andorra, concretament amb alguns punts les famílies F3-F5-F6 i F2-F7. Com a conseqüència presenten punts en comú que s'han inclòs en cada un dels grups de famílies implicats. S'ha comprovat que si aquests punts es separen, el resultat alhora de situar-los en les seves coordenades son superfícies amb buits. Corresponen doncs, a superfícies prou irregulars com per a no poder ser catalogades com a una o altra família de discontinuïtats. S'ha considerat que és més convenient en l'estudi d'inestabilitats de repetir superfícies en dos grups de famílies diferents, que no pas que quedin superfícies a trossos en totes dues famílies per tal de quedar de banda de la seguretat.

Pel que fa al càlcul de les àrees, el màxim inconvenient ha estat no treballar en tres dimensions i haver de recórrer a mètodes auxiliars. El treball amb projeccions dels punts que formen les juntes al vessant, ha provocat, en alguns casos, que s'ajuntessin superfícies situades a diferents nivells d'aquelles famílies planeres que formen graonaments amb altres famílies amb cabussament més vertical. En aquests casos s'ha treballat amb abatiments per a evitar-ho al màxim.

Aquest és el cas de les famílies F5 i F3. Les dues coincideixen amb la superfície d'erosió i son les famílies amb menor cabussament. El problema que presenten és que alhora de fer-ne l'abatiment i treballar amb aquests punts sobre el pla horitzontal i fer-ne *buffers* (veure metodologia), molts cops, superfícies que eren situades realment de forma esglaonada (amb poc espaïament) queden contigües, exagerant-ne els valors de l'àrea individualitzada real. De totes formes, que succeeixi això és un indicatiu d'un possible trencament a partir d'una sola superfície esglaonada i ha estat convenient d'analitzar. Les discontinuïtats que s'esglaonen, es consideren llavors com una sola discontinuïtat amb una rugositat de tipus esglaonada, donada l'escala en que s'interromp la continuïtat. Amb els resultats obtinguts s'observa que aquesta hipòtesi no està desencaminada, ja que les corbes magnitud-freqüència s'ajusten, com la resta de famílies i en un rang d'ordre de magnituds proper, a una corba de tipus potencial negativa, sense presentar grans esbiaixaments.

Finalment, la metodologia de càlcul d'àrees presenta un límit de precisió en la detecció de les àrees inferiors a 0.1m^2 i els resultats i anàlisi s'han determinat per sobre d'aquest valor.

5. CONCLUSIONS

Les 7 famílies de discontinuïtats detectades, tant al camp com amb el lasserescanner, coincideixen. Per tant, el *laserscanner* ha estat eficaç en la discriminació de superfícies pertanyents a discontinuïtats de la resta del terreny. El càlcul de les àrees s'ha pogut fer a partir dels 0.1 m² i la majoria dels resultats en presenten una distribució raonable, amb la qual cosa les dimensions i freqüència de les àrees menors son acceptables. Aquests resultats, juntament amb la rapidesa d'adquisició massiva de dades de forma indirecta, evitant risc per a les persones en cas d'existir-ne, el fan del *laserscanner* una eina idònia per a l'estudi d'inestabilitats com els desprendiments en zones on els seus indicis, les seves formes, es contrastin bé amb la resta de la superfície del vessant.

A continuació es presenta la freqüència acumulada dels diferents valors de les àrees de les discontinuïtats que presenten superfícies màximes a cada un dels vessants.

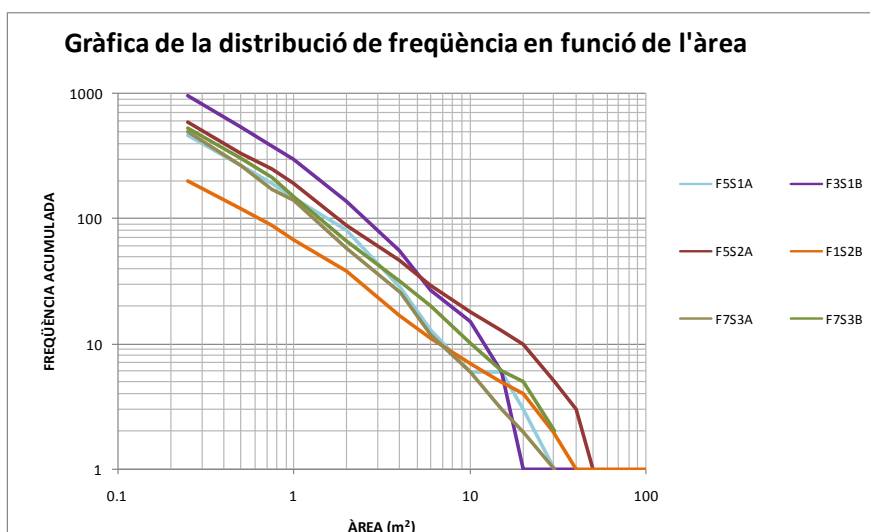


Figura 38.
Representació de la freqüència acumulada de valors en funció de la grandària de les àrees, a escala logarítmica. S'han representat les dades per a les famílies que generen àrees màximes a cada un dels sectors.



Figura 39.
Representació tendència de la freqüència acumulada en funció de la grandària de les àrees, a escala logarítmica. S'han representat les dades per a les famílies que generen àrees màximes a cada un dels sectors.

Totes presenten en comú que com major és cada àrea, menor és la freqüència amb que es troba i aquesta relació es pot aproximar a una funció potencial negativa. A l'annex II als resultats s'hi ha representat les distribucions d'aquelles famílies que presenten ruptura planar en cada un dels vessants.

La funció que regeix la distribució de les àrees calculades es pot comparar amb la proposada per altres autors per a relacionar la magnitud i la freqüència de moviments de vessant (Hungre et al., 1999; Dussauge et al., 2001). Aquests autors associen els canvis que poden presentar els paràmetres A i b de l'equació que regeix la disminució de freqüència en funció amb l'augment de la magnitud, expressada en volums: $\text{freqüència} = A (\text{magnitud})^{-b}$. El valor del paràmetre b oscil·la als seus treballs entre 0.4 i 1 (Taula 17) i se n'atribueixen les variacions al grau de fracturació del massís rocós. Per a valors molt baixos, de l'ordre de 0.4, s'hi associen roques massives, poc fracturades i amb major tendència a generar majors volums (Hungre et al., 1999). En canvi, a roques molt fracturades metamòrfiques o ígnies s'hi associen valors més alts. És un paràmetre que es manté bastant estable d'una regió a una altra amb la mateixa litologia i condicions de fracturació (Dussauge-Peisser et al., 2001).

S'han dibuixat gràfics expressant la relació entre l'àrea (m^2), assimilada com a magnitud, i la freqüència acumulada (annex II als resultats). Les dades utilitzades són les d'aquelles discontinuïtats que generen ruptura de tipus planar. Els valors b obtinguts en aquesta tesina oscil·len entre 0.95 i 1.41. El valor del pendent de la recta de regressió, dibuixada sobre el gràfic d'eixos logarítmics, es compara amb els valors obtinguts amb els altres mètodes. A continuació es resumeix una taula (Taula 17) comparant aquest valor entre els diferents autors i els obtinguts en aquesta tesina:

Referencies	Lloc	Característiques geològiques	Finestra temporal	Volums mostrejats m ³	Rang de la corba que s'ajusta a la funció potencial m ³	Paràmetre b
Gardner, 1970	Alberta, Canada.	Roques calcàries i quarzítiques	2 estius	10 ⁻⁶ -10	10 ⁻² -10	0.72
C. Dussauge-Peisser et al. (2001)	Arly gorges, Alps francesos	Roques metamòrfiques i sedimentàries	22 anys	5-10 ⁴	20-3000	0.45±0.15
C. Dussauge-Peisser et al. (1996)	Grenoble, French Alps	Calcàrees	60 anys	0.5-10 ⁶	50-10 ⁶	0.41±0.11
C. Dussauge-Peisser. (1992)	Yosemite Valley, California	Granítiques	78 anys	1-10 ⁶	50-10 ⁶	0.46±0.11
Dussauge et al. (2001)	World wide	Indiferenciades	10000 anys	10 ⁻³ -2.10 ¹⁰	3.10 ⁷ -2.10 ¹⁰	0.52
Hungre et al. (1999)	British Columbia, Canadà	Roques ignies massives	30 anys	10 ⁻² -10 ⁸	10 ² -10 ⁴	0.43
			13 anys		1-10 ⁴	0.4
		Roques metamòrfiques molt fracturades	22 anys	10 ⁻² -10 ⁸	1-10 ⁴	0.65
Rousseau (1999)	Mahaval, La Reunion, Illa francesa	Roques basàltiques	2 mesos	9.10 ⁶ (Deduit de l'amplitud de senyals sísmiques)	1.5 ordres de magnitud	1
Aquest estudi	Solà d'Andorra la vella	Roques granodiorítiques		0.10-100 m ² (Es calculen àrees)	0.1-10 m ²	1.2 ± 0.2

Taula 17. Comparació dels diferents paràmetres de b obtinguts als treballs anteriors.
Dades extretes de C. Dussauge- Peisser et al.(2001).

Es pot comprovar que els valors són superiors als valors exposats als altres treballs.

De totes formes, és important assenyalar que estem treballant en unitats diferents: de volum per als anteriors treballs i d'àrees en el present treball. Si bé la variació de les àrees de les famílies que generen inestabilitats arriben a expressar la variació de la magnitud del fenomen de desprendiment, per a generar una àrea només hi ha d'intervenir una discontinuïtat i la seva àrea, en canvi, per a generar volums n'intervenen les discontinuïtats que els limiten amb les seves respectives àrees. La influència en la possible interacció entre discontinuïtats i les seves distribucions respectives de les àrees per a generar volums de dimensions determinades és un aspecte que no s'ha estudiat en aquesta tesina. De totes formes, al gràfic Magnitud-Freqüència acumulada es comprova que hi ha una estreta relació entre la forma i pendent de la recta generada per volums realitzada per altres autors i la gràfica que s'ha generat en aquest estudi mitjançant les àrees, coincidint amb les conclusions extretes en l'estudi realitzat per Hungre, O; enfocat a determinar la relació entre mesures lineals, areals i de volum i la seva respectiva freqüència acumulada.

Una altra diferència important entre estudis anteriors i el present és la zona en la qual s'enfoquen els estudis. Als treballs anteriors, aquesta zona és la zona d'arribada, mentre que aquí estem tractant la zona de sortida. Aquesta diferència és important ja que estudiar la zona de sortida suposa un recull més precís de la quantitat de fenòmens de petites dimensions, mentre que a la zona d'arribada, només es recolliran les dades d'esdeveniments a partir d'unes determinades dimensions: aquelles que hi arriben (el límit entre la zona de trajecte i d'arribada és generalment confús). Aquesta pot ser la causa d'una de les principals diferències entre les relacions Magnitud-Freqüència acumulada obtingudes, ja que les dades provinents de les zones d'arribada presenten un esbiaixament molt major en aquest rang de valors, mentre que en aquest treball l'ajust a la corba de tipus potencial és més ajustada. Això pot provocar diferències notables entre els paràmetres determinats en cada cas, ja que aquest falta de dades dels volums inferiors pot suavitzar el pendent b d'aquesta recta a escala logarítmica.

Les àrees màximes resultants en els diferents sectors son relativament petites (taula 16). Alhora, a partir dels resultats de camp es coneix que existeix una relació estructural entre les famílies de discontinuïtats i que, segons l'ordre en el qual han anat formant-se cada una de les famílies de discontinuïtats, existeix una interrupció sistemàtica de la continuïtat de les falles prèvies F6, F1, F4 per les posteriors, F7 i F2. Alhora, la continuïtat de les diàclasi existents, F3 i F5, també queda interrompuda. Aquests resultats determinen que existeix un límit superior en la magnitud dels desprendiments rocosos en la zona estudiada lligat a una limitació en la persistència de les famílies de discontinuïtats.

BIBLIOGRAFIA

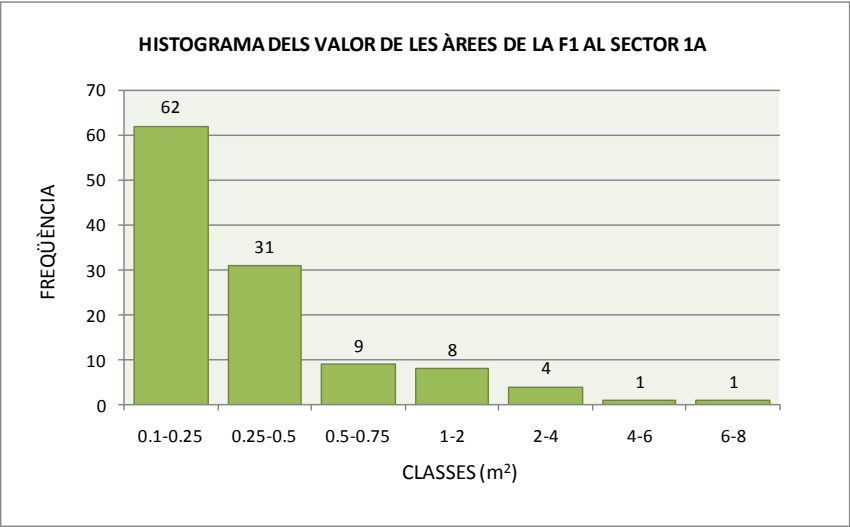
- Dussauge-Peisser, C., Helmstetter, A., Grasso, J-R., Hantz, D., Desvarreux, P., Jeannin, M. i Giraud, A. (2002): Probabilistic approach to rock fall hazard assesment: potential of historical analysis.
- Ayala- Carcedo, F.J. Introducció a los riesgos geológicos. Riesgos geológicos; IGME. Madrid Vol 1, p3-21.
- Baeza, C.; Corominas, J. (2001): Assesment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth surface processes and landforms*, 26: 1251-1263.
- Bouchez, J.L. and Gleizes, G., 1995. Two-stage deformation pf the Mont-Louis-Andorra granite pluton (Variscan Pyrenees) inferred from magnetic susceptibility anisotropy. *Journal of the Geological Society, London*, vol. 152: p669-679."
- Braam, R. , Weiss, E. , Burrough, P. A. (1987): Spatial and temporal analysis of mass movement using dendrochronology. *Catena* 14, p573–584.
- Caine, N. (1984): The rainfall intensity duration control of shallow landslides and debris flows *Geografiske Annaler, Series A*, p62:23-27
- Carrara, A. (1983): Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Mathematical Geology*, Vol XXV: p403-426.
- Chung , C.; Fabri, A.G. (1995): multivariate regression analysis for landslide hazard zonation. In Carrara, A.; Guzzetti, F. (Eds): *Geografical information systems in assessing natural hazards*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, Netherlands, p107-142.
- Copons, R. (2007). *Avaluació de la perillositat de caigudes de blocs rocosos al solà d'Andorra la Vella*.
- Copons, R., Altimir, J., Amigó, J., Vilaplana J.M. (2001): *Estudi i protecció enfront les caigudes de blocs rocosos a Andorra la Vella: Metodologia Eurobloc. Primeres jornades del CRECIT: La gestió dels riscos naturals*. Andorra la Vella, Institut d'Estudis Andorrans, Principat d'Andorra: p134-149.
- Corominas, J. i Moya J. (1999): Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat river basin, esastern Pyrenees, Spain. *Geomorphology*, 30:p79-93.
- Descoeudres, F, i Zimmermann (1987): Three-Dimensional dynamic calculation of rockfalls. *Proceedins 6th. International Congress on Rock Mechanics*. Mortreal, Balkema. Rotterdam, p337-342.
- Evans, S.G i Hungr, O. (1993): The assesment of rockfall hazard at the base of talús slopes. *Can Geotech. J.*, 30: p620-636.
- Fantucci, R. i Sorriso-Valvo, M. (1999). Dendrogeomorphological analysis of a slope near Lago, Calabria (Italy), *Geomorphology*, 30, p165–174.
- Fell, R., Corominas, J. Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E. Savage, W.Z (2008): Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology* 102 (2008) p85-98.
- Flageollet, J.C. I Weber, D. (1996): *Fall. A Dikau, R; Brundsden, D; Schrott, L. i Ibsen M.L. (Eds.) (1996): Landslide recognition: Identification, movement and causes*. Report nº 1 of the European Comission Enviroment Programme. John Wuley et Sons Chichester, p13-28.

- Giani, G.P (1992): Rock slope stability analysis, ed: Balkema. Rotterdam, Netherlands p40-42.
- Govern d'Andorra, Ministeri d'Ordenament Territorial, Vigilància del vessant de la solana d'Andorra la Vella, informe no 14, Caiguda de blocs rocosos a la Paret de Santa Coloma, Data: 17 d'agost del 2003, Editat per Euroconsult i Eurogeotecnica, Ref. N760-2.
- Govern d'Andorra, Ministeri d'Ordenament Territorial, Vigilància del vessant de la solana d'Andorra la Vella, informe no 16, Caiguda de blocs rocosos al Forat Negre, Data: 2 d'abril del 2004, Editat per Euroconsult i Eurogeotecnica, Ref. O-927.
- Govern d'Andorra, Ministeri d'Ordenament Territorial, Vigilància del vessant de la solana d'Andorra la Vella, informe no 19, Caiguda de blocs rocosos al Forat Negre, Data: 20 d'abril del 2008, Editat per Euroconsult i Eurogeotecnica, Ref. R-1392
- Gruen, A. and Akca, D., 2005. Least squares 3D surface and curve matching. ISPRS Journal of photogrammetry & Remote Sensing, 59: p151-174.
- Guzzetti, F.; Carrara, A. Cardinali, M; Reichenbach, P. (1999): Landslide hazard evaluation, a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. Geomorphology, 31:p181-216.
- Hungr, O., Evans S.G (1999): Magnitude and frequency of rock falls and rock slides along the main transportation corridors of southwestern British Columbia. Can Geotech, J. 36:p224-238.
- Hungr, O., McDougall S., Wise M. i Cullen M (2008): Magnitude–frequency relationships of debris flows and debris avalanches in relation to slope relief.
- Hupp, C. R., Osterkamp, W. R. i Thornton, J. L. (1987): Dendrogeomorphic evidence and dating of recent debris flows on Mount Shasta, northern California. U.S., Geol.Surv. Prof., 1396B, p1–39.
- Hurlimann, M.; Corominas, J.; Moya, J. i Copons, R. (2003): Debris-flow events in the eastern Pyrenees. Preliminary study on initiation and propagation. A Rickenmann, D. i Chenglung C. (Eds.): Debris flow hazards mitigation: Mechanics, prediction and assessment. Millpress, Rotterdam, p115-126
- Kummenacher, B. i Keuse, H.R. (1996): Rockfall simulation and hazard mapping based on digital terrain modes (DTM), European Geologist, 12/1996.
- Lateltin, O. (1997): Recommandations: Prise en compte des deangers dus aux mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire. OFAT, OFEE i OFEFP. Berne, Seitzerland, p 42.
- López Carreras, C., Ruíz, J. i Riera, M. (1988): Análisis del movimiento de los bloques y optimización de las posibilidades de protección. II simposio de taludes y laderas inestables. Andorra la Vella. p269-281.
- López Carreras, C.; Ruíz, J.; Amigó, J.; Altimir, J. (1988): Análisis del movimiento de los bloques y optimización de las posibilidades de protección. II Simposio nacional sobre taludes y laderas inestables. Andorra la Vella, p269-281.
- Mauldon M., W. M. Dunne i M. B. Rohrbaugh, J. (2000): Circular scanlines and circular windows: new tools for characterizing the geometry of fracture traces. Journal of Structural Geology Volum 23. p247-258.

- Pahl, P.J. (1979): Estimating the mean length of discontinuity traces.
- Pallàs, R. Vilaplana, J.M Guinau, M., Falgàs, E., Alemany, X. i Muñoz, A. (2004): A pragmatic approach to debris flow hazard mapping in areas affected by hurricane Mitch: An example from NW Nicaragua. *Engineering Geology*, Vol nº 72, Issue 1-2: p57-72.
- Parise i Wasowski (1999): Landslide activity maps for landslide hazard evaluation: Three case studies from southern Italy. *Natural Hazards*, 20: p159-183.
- Perez Arcas (2005): Càlcul de la freqüència de desprendiments a la Canal de l'Alzina. Codi: ETCM PER, CEDECMA de l'Escola Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona.
- Priest, S. D. and J. A. Hudson, 1981. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scan line surveys: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, v. 18: p183-197.
- Priest, S.D. (1993) *Discontinuity analysis for rock engineering*. Chapman et Hall, London.
- Rouiller, J.D.; Jaboyedoff, M.; Marro, Ch.; Philipossian, F. i Mamin, M. (1998): *Pentes instables dans le Pennique valaisan. Rapport final du programme national de recherche PNR 31/CREALP 98*. Ed. Vdf Hochschulverlag AG i ETH, Zürich, p239.
- Santacana, N. Baeza, C.; Corominas, J.; De Paz, A.; Marturià, J. (2001) Análisi estadístico multivariante basado en SIG para la cartografía de susceptibilidad a deslizamientos superficiales. Aplicación a dos áreas del Prepirineo Catalán. V simposio nacional sobre taludes y laderas inestables. Madrid, vol II: p487-498.
- Shroder J.F. (1978) Dendrogeomorphological analysis of mass movement on Table Cliffs Plateau, Utah. *Quat Res* 9:p168-185.
- Soeters i Van Westen, C.J (1996): Slope Instability recognition, analysis and zonation. A Turner, A.K; i Schuster, R.L Eds: *Landslides. Investigation and mitigation*. Special report 247, transportation research board. National research council, washington D.C p129-177.
- Van Westen, C.J, van Asch, T.W.J, Soeters, R (2005): Landslide hazard and risk zonation-why is it still so difficult?. *Bull Eng. Geol. Env.* (2006) 65 p167-184
- Varnes, D.J (1984) *Landslide hazard zonation: A review of principles and practice* *Natural Hazards*, Vol. 3. UNESCO. Paris, p63.
- Weiss, M., 2006. Techniques for estimating fracture size: A comparison of methods. *Technical note in: International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 45: p460-466.
- Whalley, W. B (1984): *Rockfalls* a Brunsden, D. i Prior D.B. (Eds.): Slope instability. Wiley and Sons, Chichester, p219-256
- Woodcock, N.H., 1977. Specification of fabric shapes using an eigenvalues method. *Geological Society of America Bulletin*. v. 88: p1231-1236.

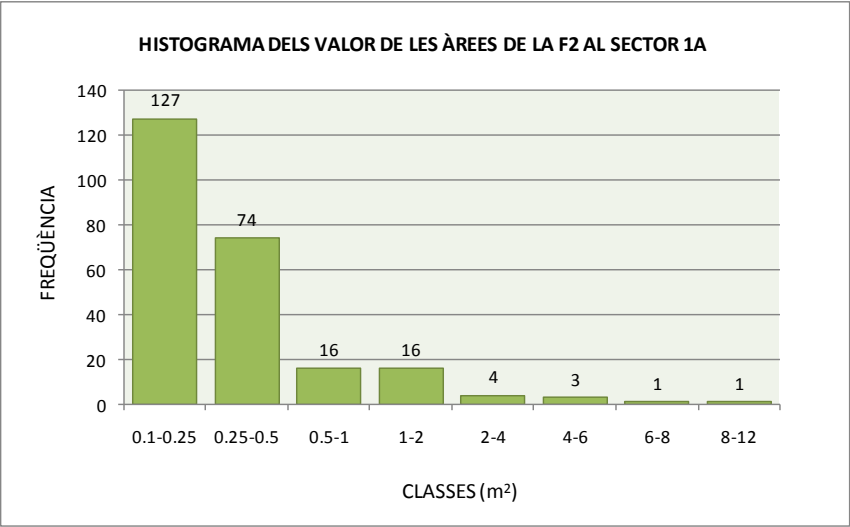
ANNEX I: DISTRIBUCIÓ D'ÀREES PER A CADA FAMÍLIA SEGONS SECTORS

SECTOR 1A



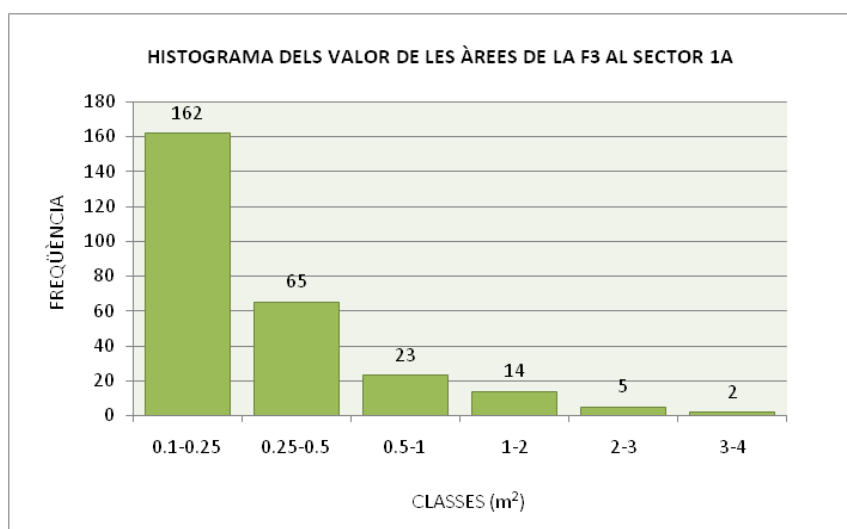
F1S1A		
ÀREES		
MITJ	MIN	MAX
0.49	0.1	6.13

Nº de dades: 116



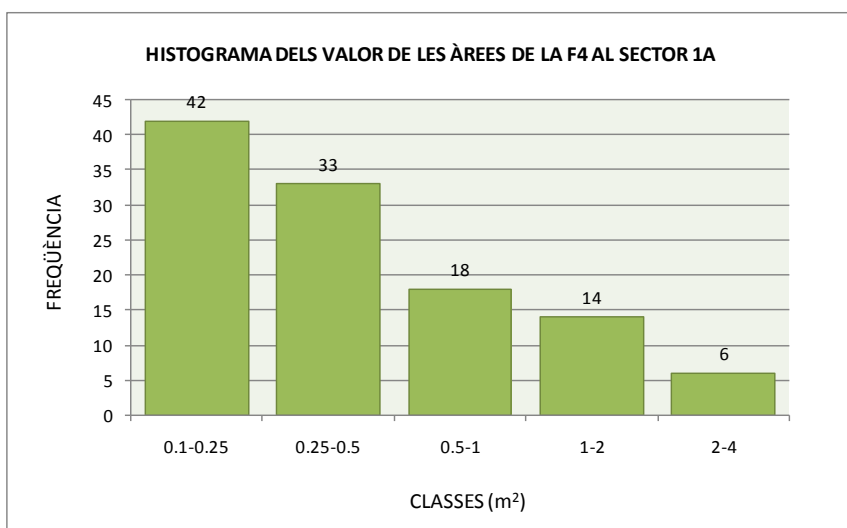
F2 S1A		
ÀREES (m²)		
MIT	MIN	MAX
0.51	0.1	9.55

Nº de dades: 242



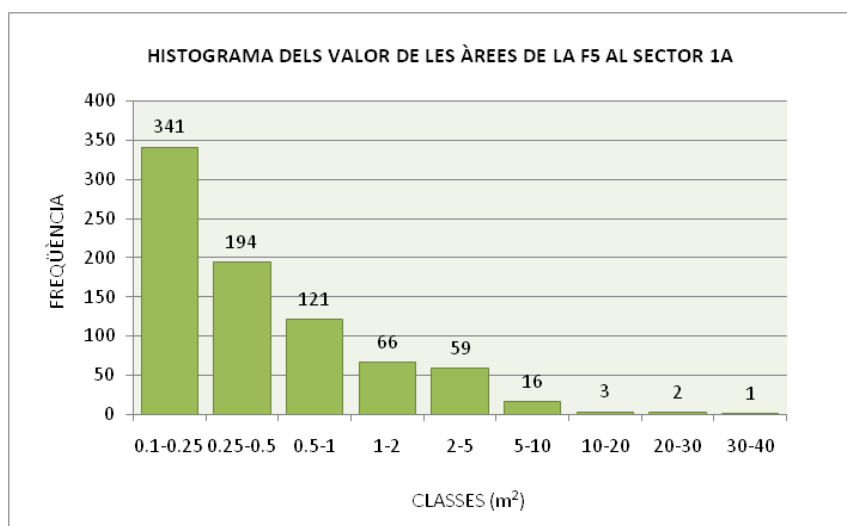
F3 S1A ÀREES (m²)		
MIT	MIN	MAX
0.26	0.1	3.17

Nº de dades:271



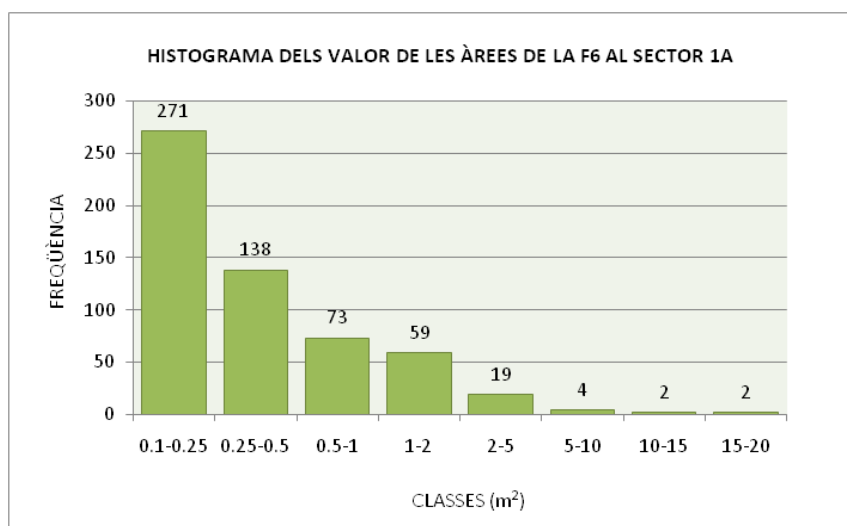
F4 S1A ÀREES (m²)		
MIT	MIN	MAX
0.49	0.1	3.68

Nº de dades: 113



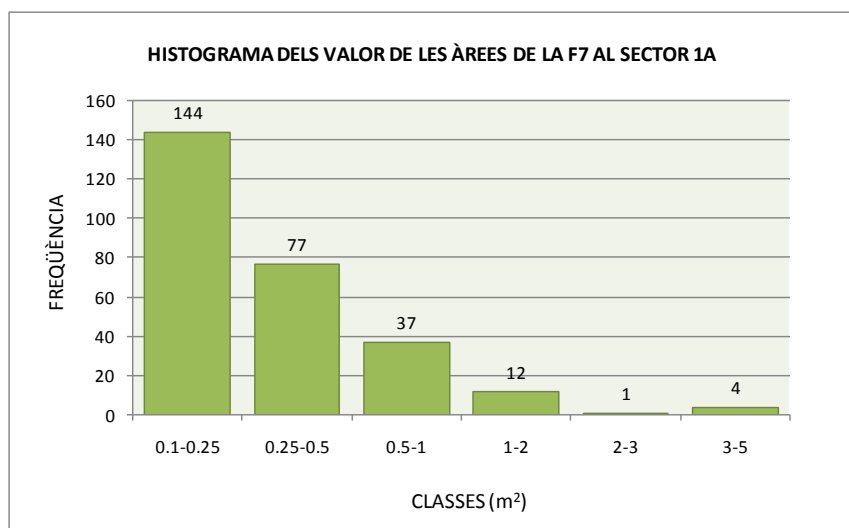
F5 S1A ÀREES (m²)		
MIT	MIN	MAX
0.73	0.1	38.15

Nº de dades: 803



F6S1A ÀREES (m²)		
MIT	MIN	MAX
0.49	0.1	16.96

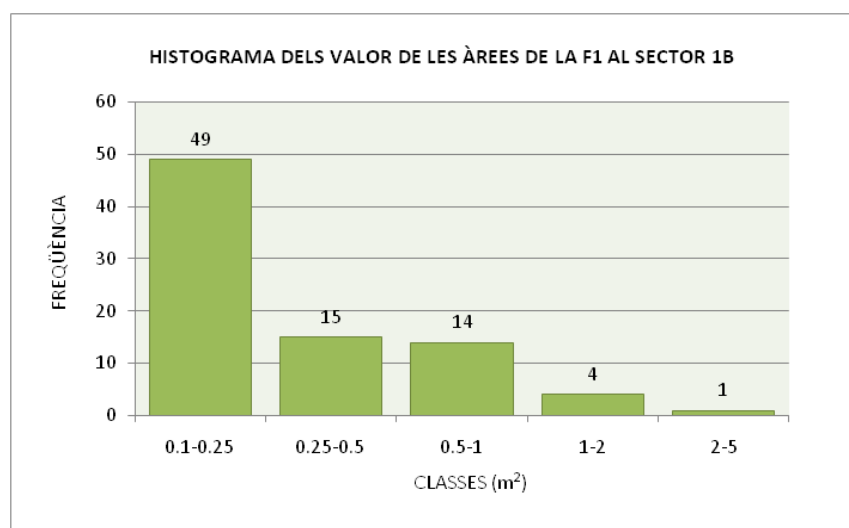
Nº de dades: 568



F7 S1A ÀREES (m²)		
MIT	MIN	MAX
0.39	0.1	4.01

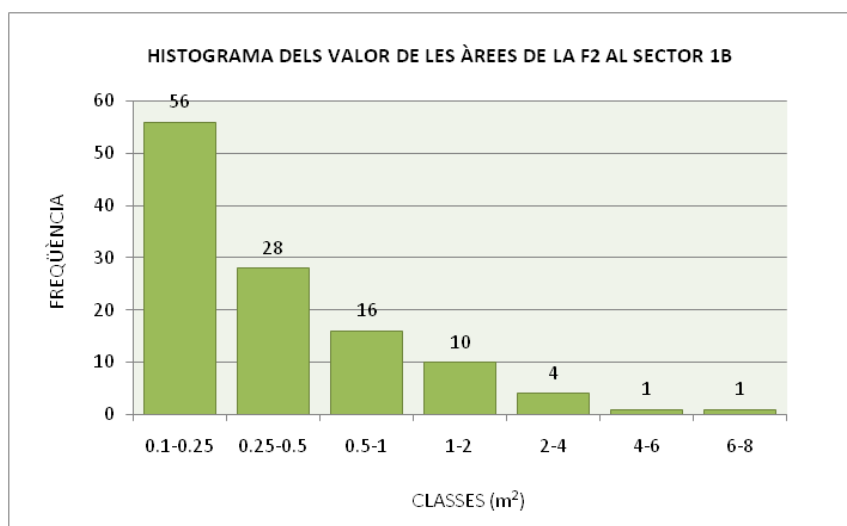
Nº de dades: 275

SECTOR 1B



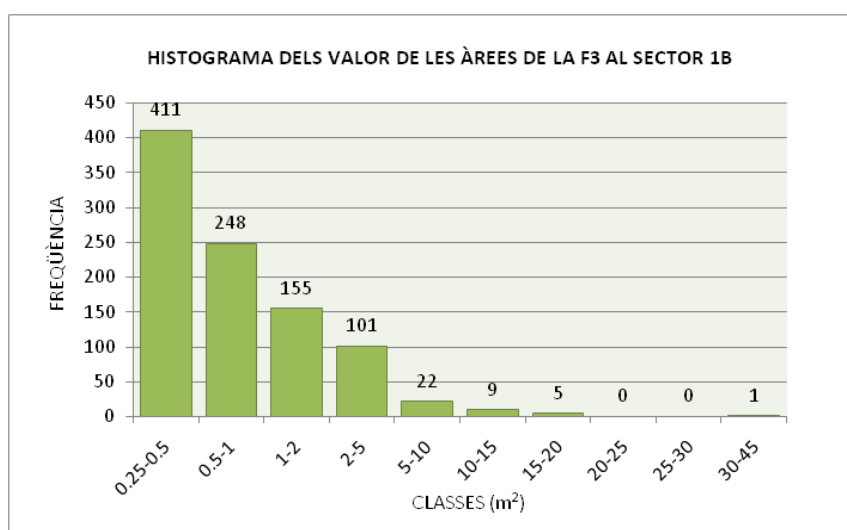
F1 S1B ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.38	0.1	4.47

Nº de dades: 83



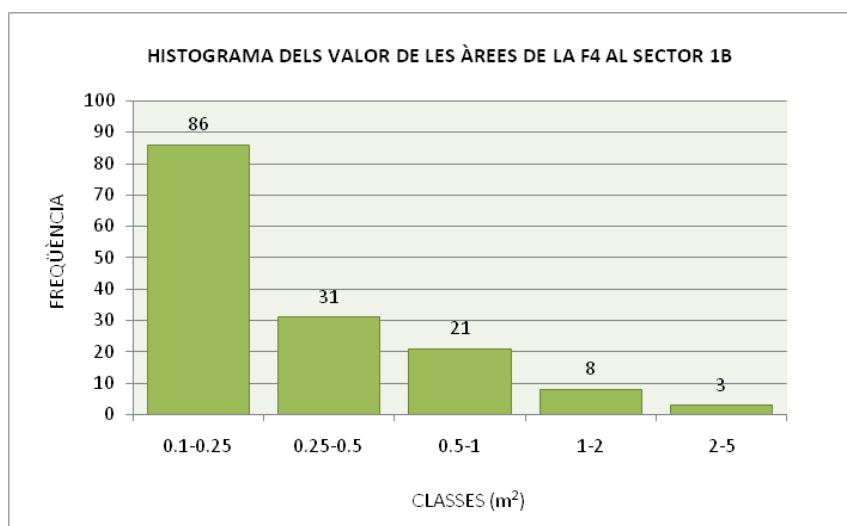
F2 S1B ÀREES (m2)		
MITJA	MIN	MAX
0.34	0.1	7.64

Nº de dades: 116



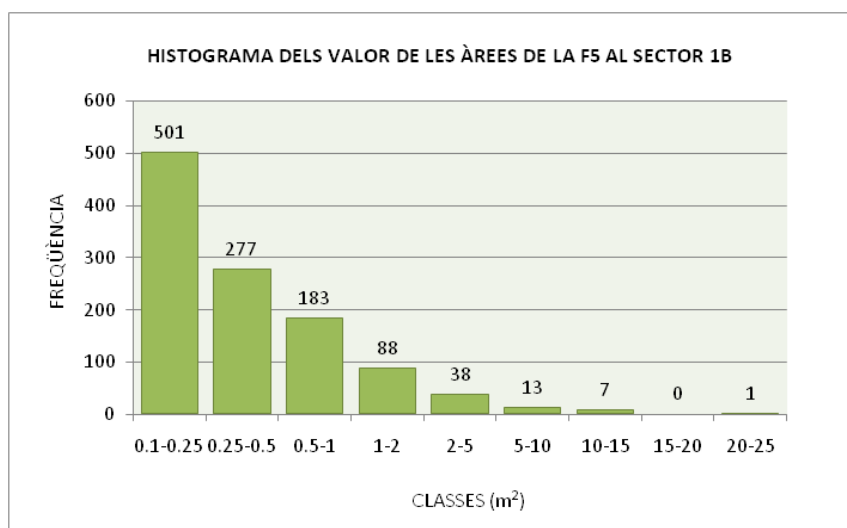
F3 S1B ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.67	0.1	41.55

Nº de dades: 952



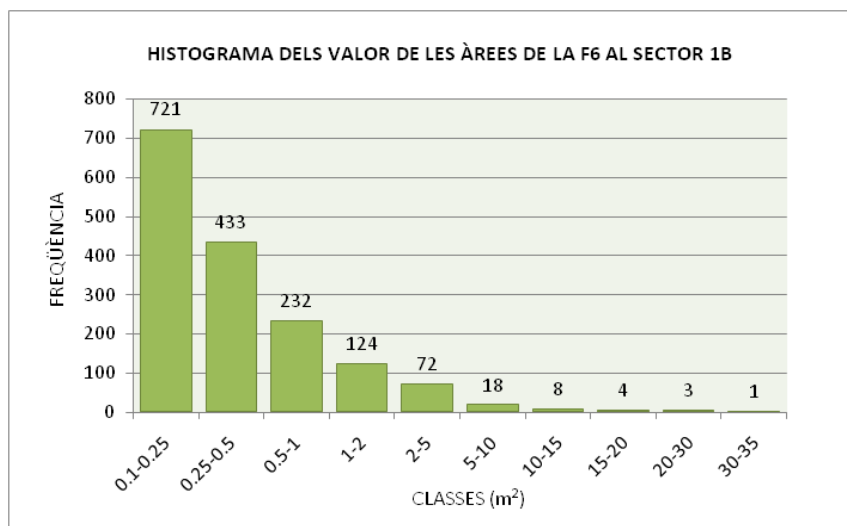
F4 S1B ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.39	0.1	3.83

Nº de dades: 149



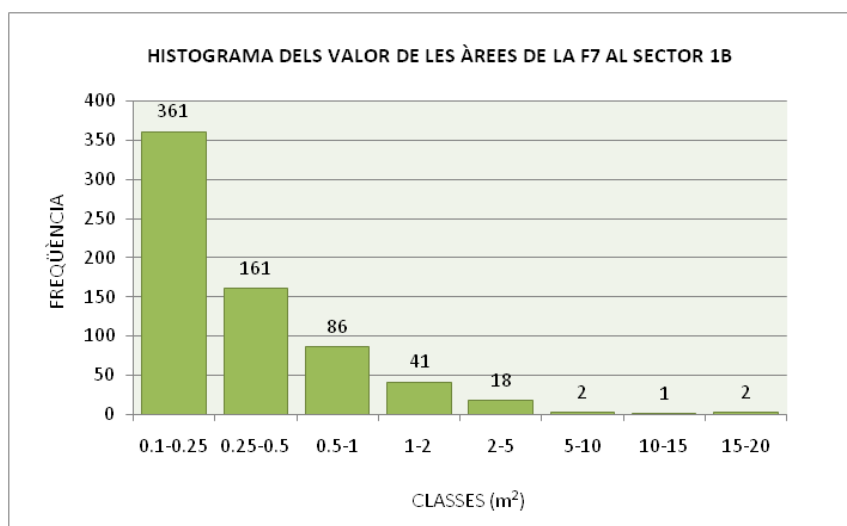
F5 S1B ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.51	0.1	23.98

Nº de dades: 1108



F6 S1B ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.58	0.1	31.84

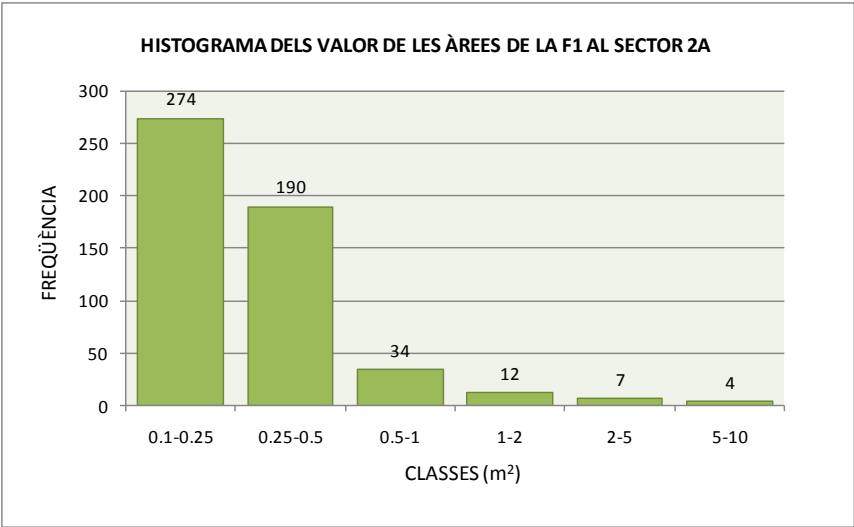
Nº de dades: 1166



F7 S1B ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.50	0.1	16.56

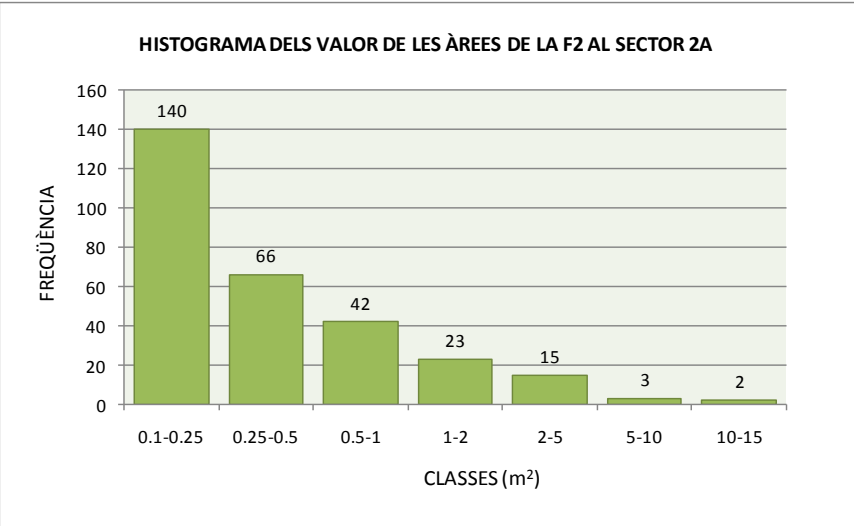
Nº de dades: 672

FAMÍLIES SECTOR 2A



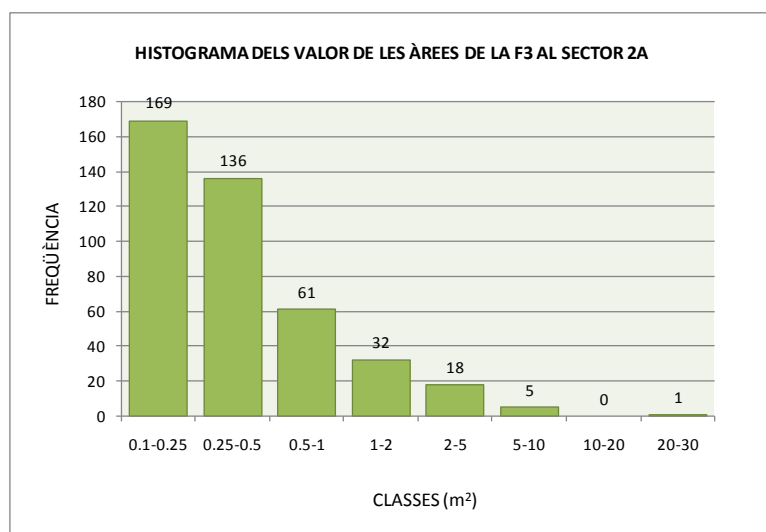
F1 S2A ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.44	0.1	9.62

Nº Dades: 247



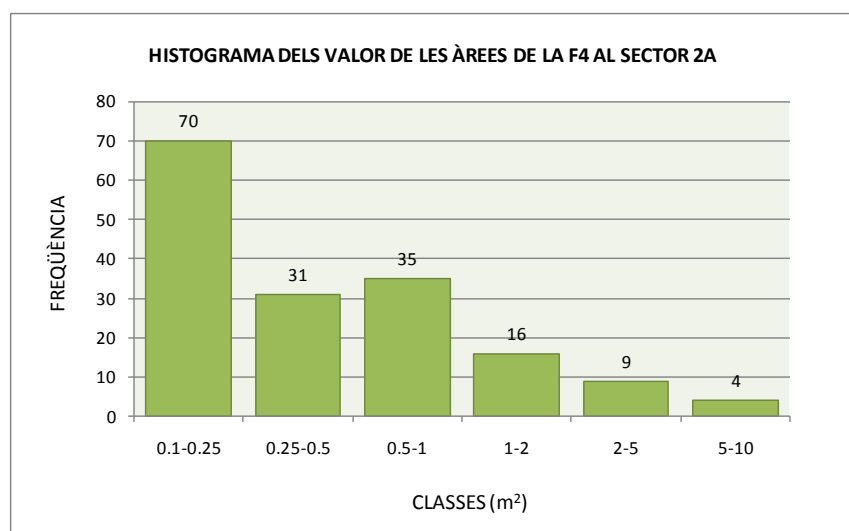
F2 S2A ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.68	0.1	11.74

Nº Dades: 291



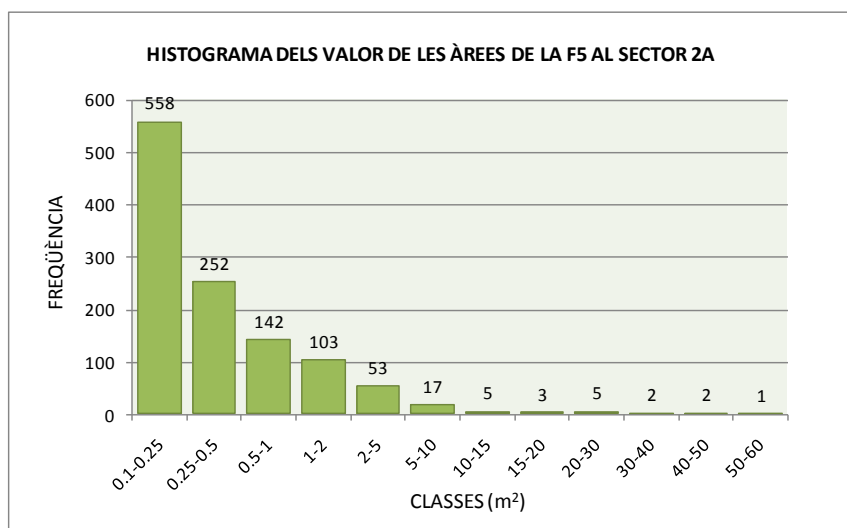
F3 S2A ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.65	0.1	22.98

Nº Dades: 422



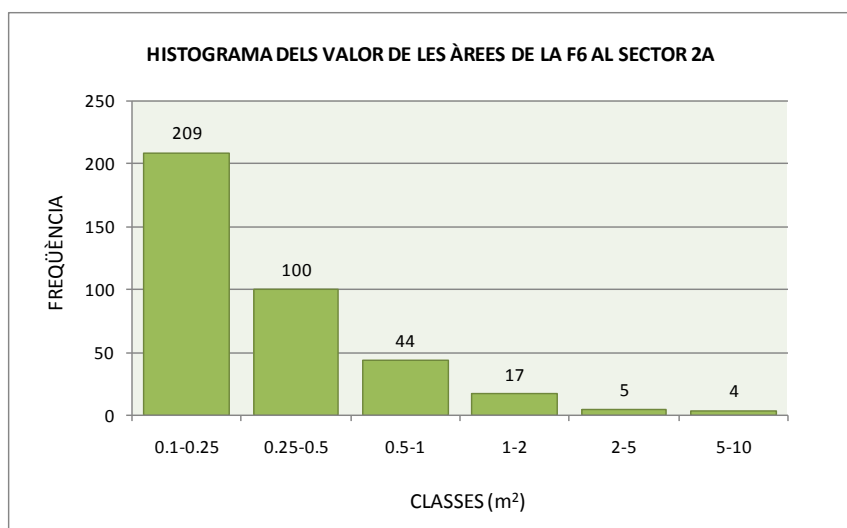
F4 S2A ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.76	0.1	8.68

Nº Dades: 165



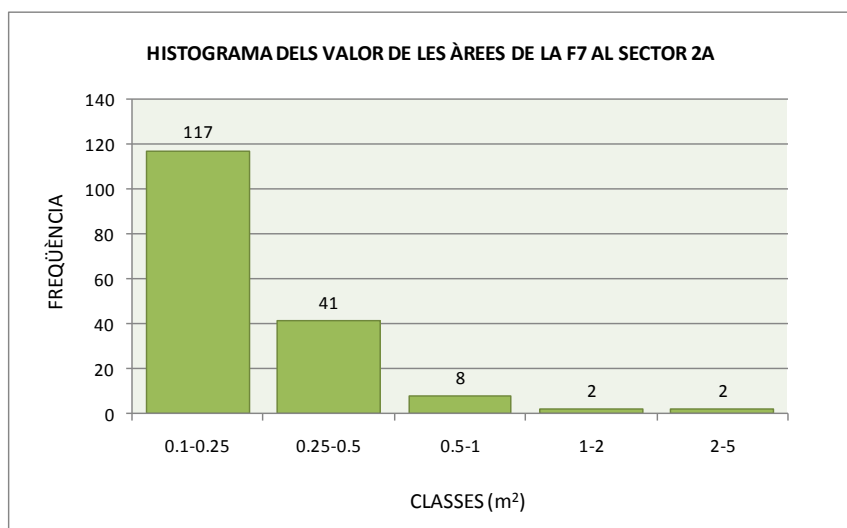
F5 S2A ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
1.01	0.1	53.86

Nº Dades: 1143



F6 S2A ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.42	0.1	6.61

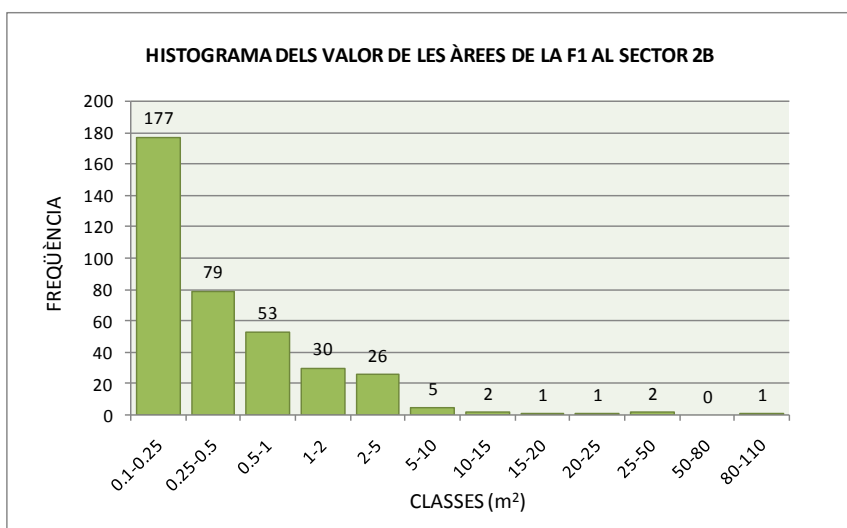
Nº Dades: 379



F7 S2A ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.48	0.1	2.92

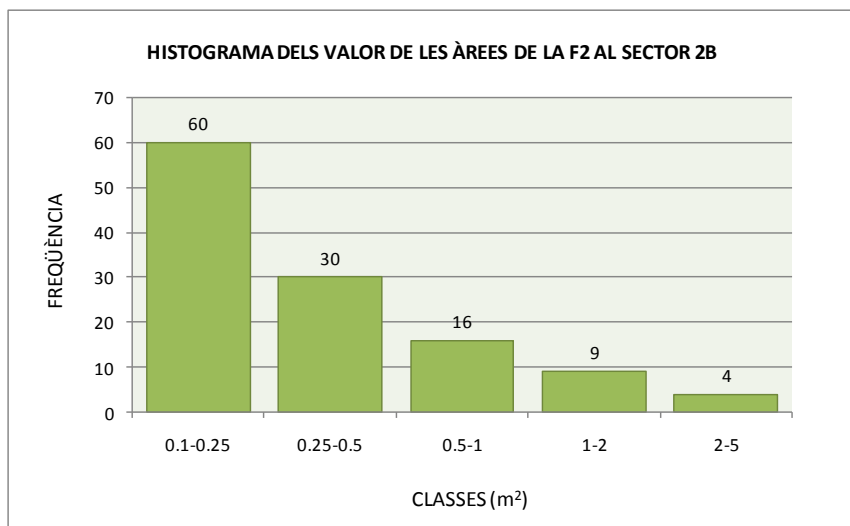
Nº Dades: 170

FAMÍLIES SECTOR 2B



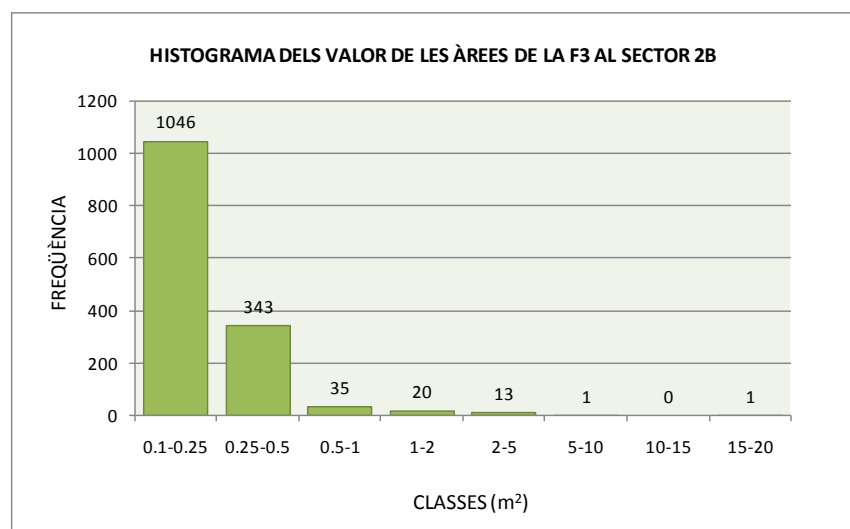
F1 S2B ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
1.29	0.1	108.00

Nº Dades: 377



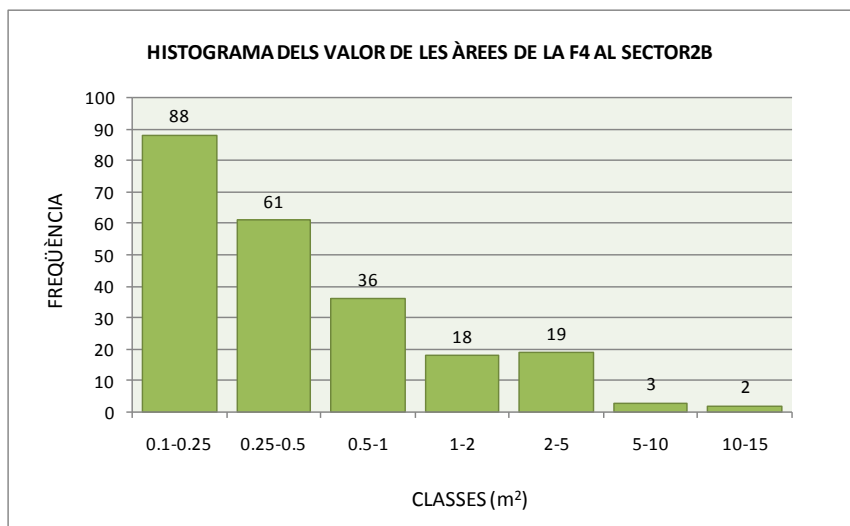
F2 S2B ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.45	0.1	3.42

Nº Dades: 119



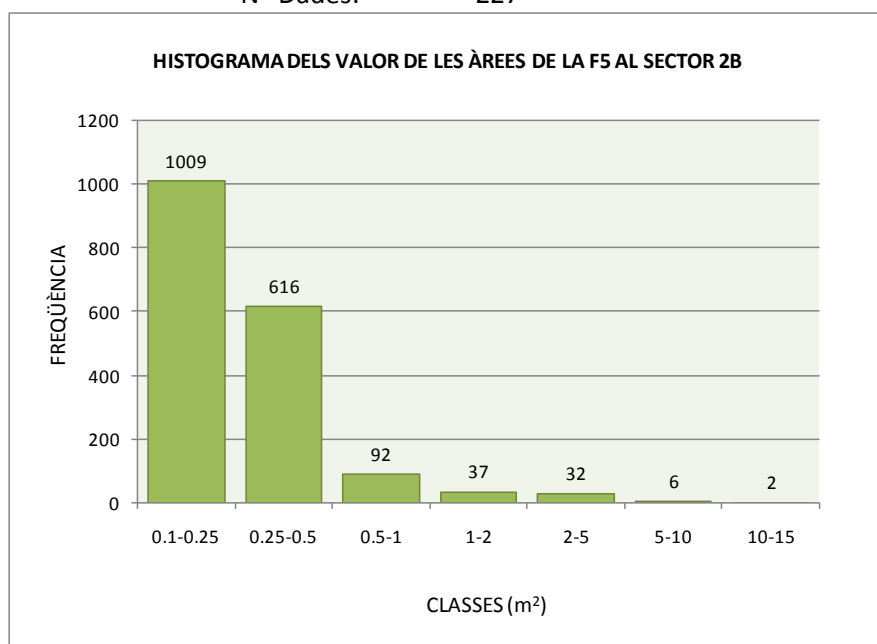
F3 S2B ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.43	0.1	15.89

Nº Dades: 413



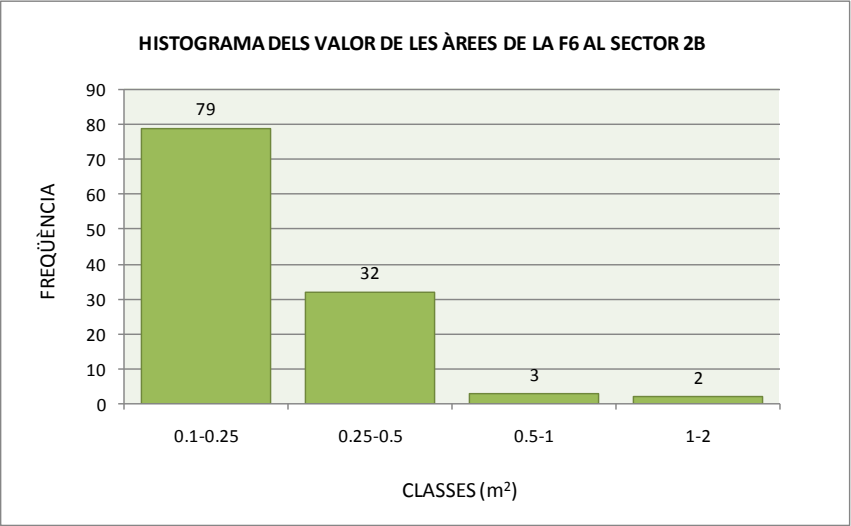
F4 S2B ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.87	0.1	14.07

Nº Dades: 227



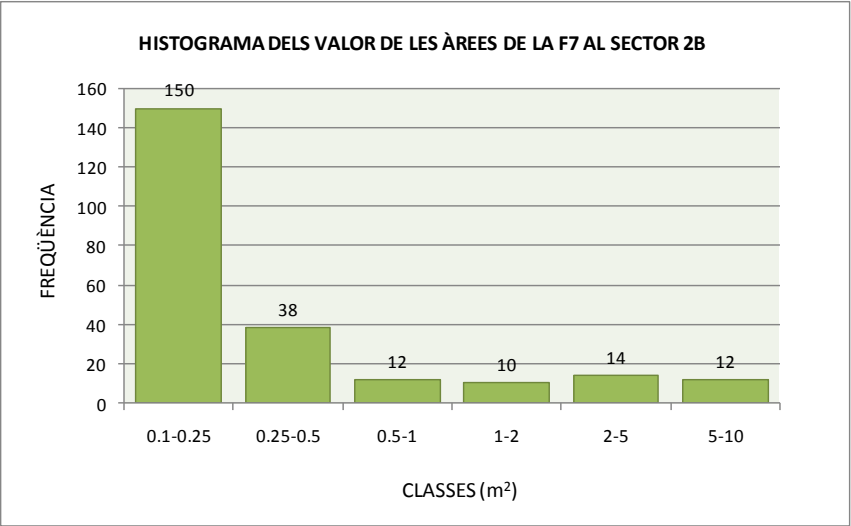
F5 S2B ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.53	0.1	11.75

Nº Dades: 785



F6 S2B ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.30	0.1	1.55

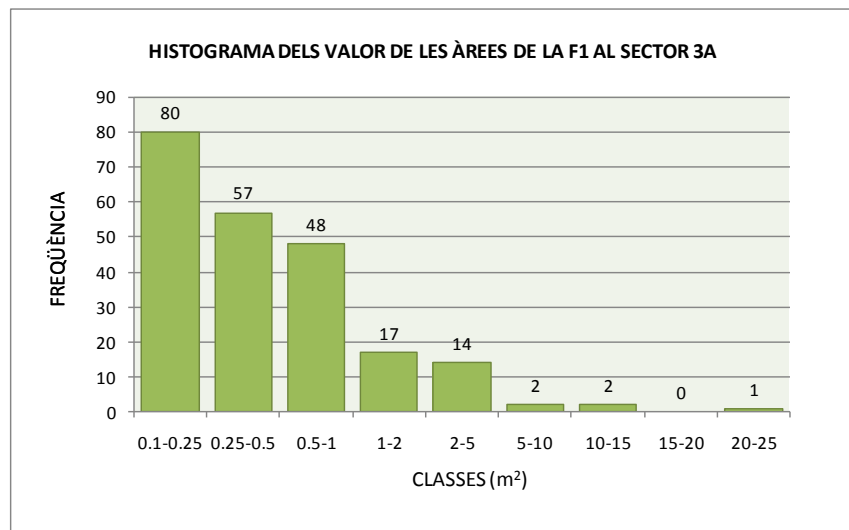
Nº Dades: 37



F7 S2B ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.80	0.1	8.91

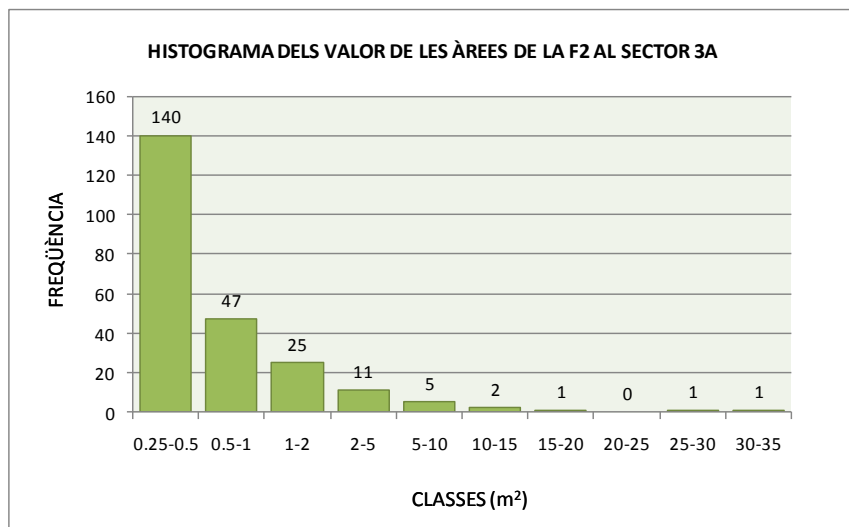
Nº Dades: 236

FAMÍLIES SECTOR 3A



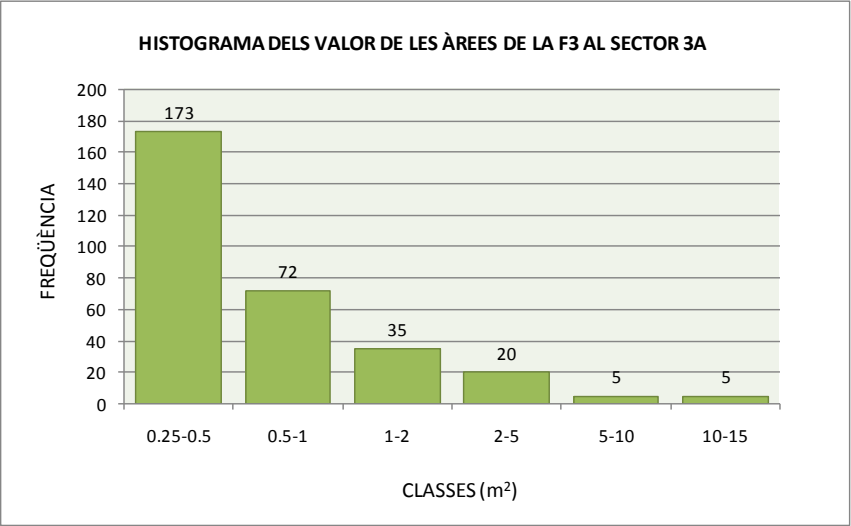
F1 S3A ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.72	0.1	24.39

Nº Dades: 221



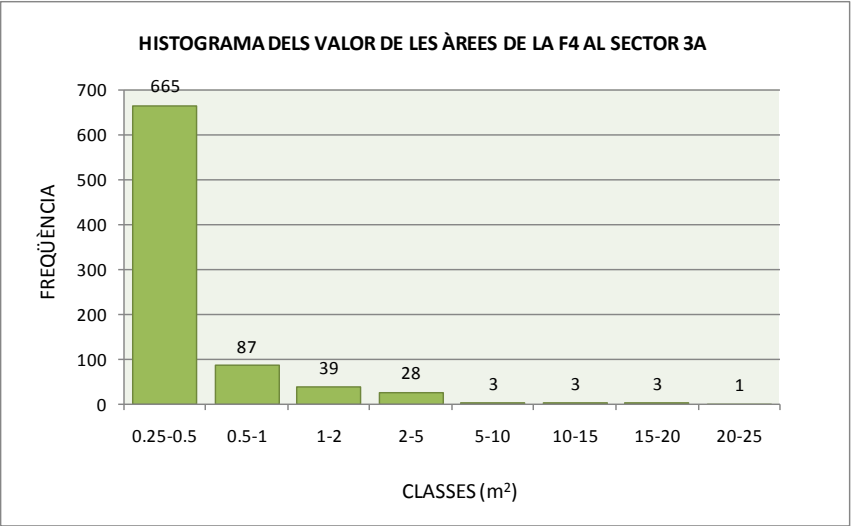
F2 S3A ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
1.16	0.1	32.34

Nº Dades: 233



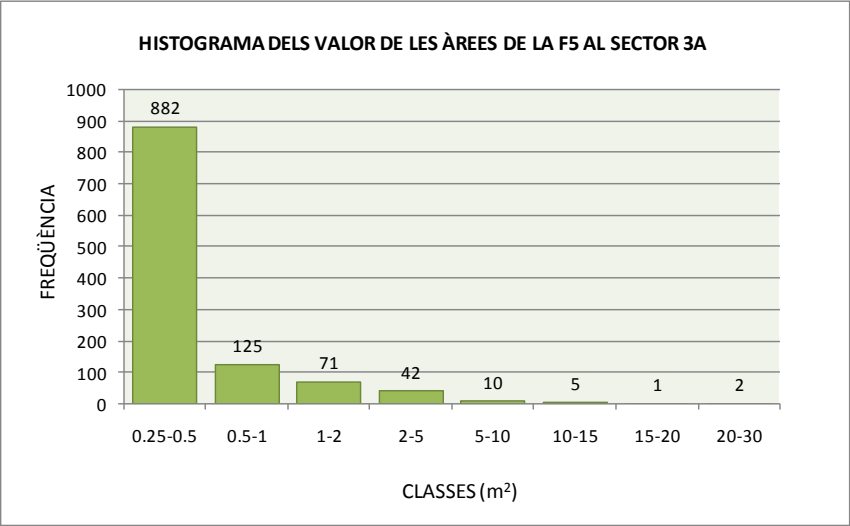
F3 S3A ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.50	0.1	13.45

Nº Dades: 741



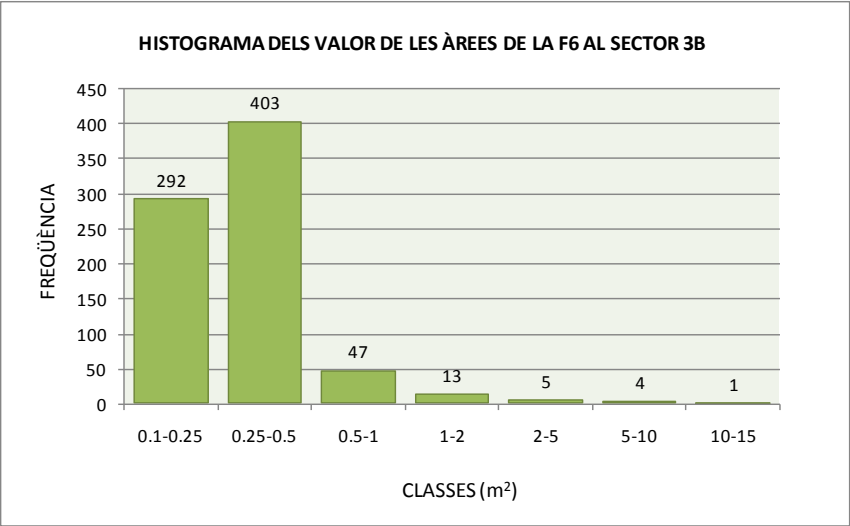
F4 S3A ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.62	0.1	20.23

Nº Dades: 717



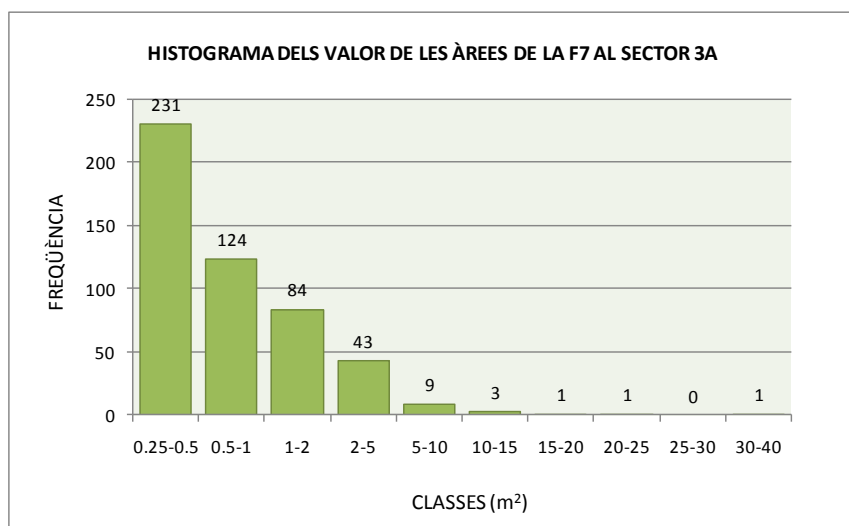
F5 S3A ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.61	0.1	29.92

Nº Dades: 1138



F6 S3A ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.40	0.1	13.52

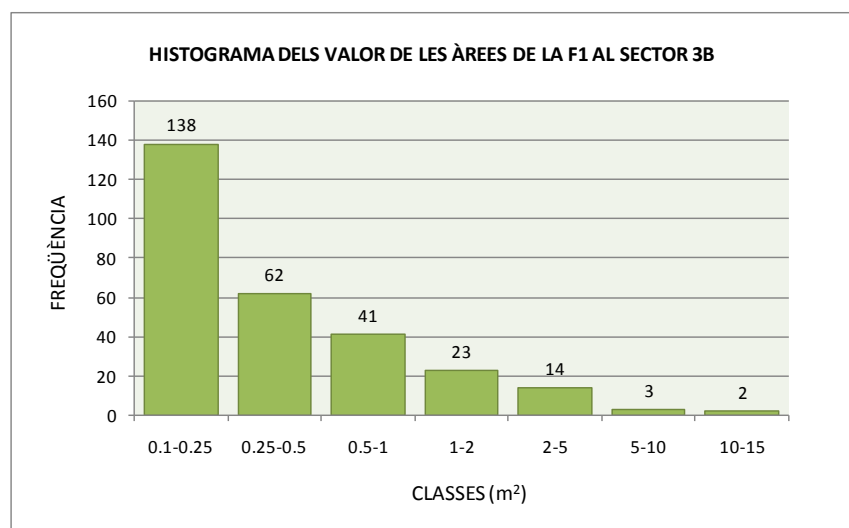
Nº Dades: 473



F7 S3A		
ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.67	0.1	39.13

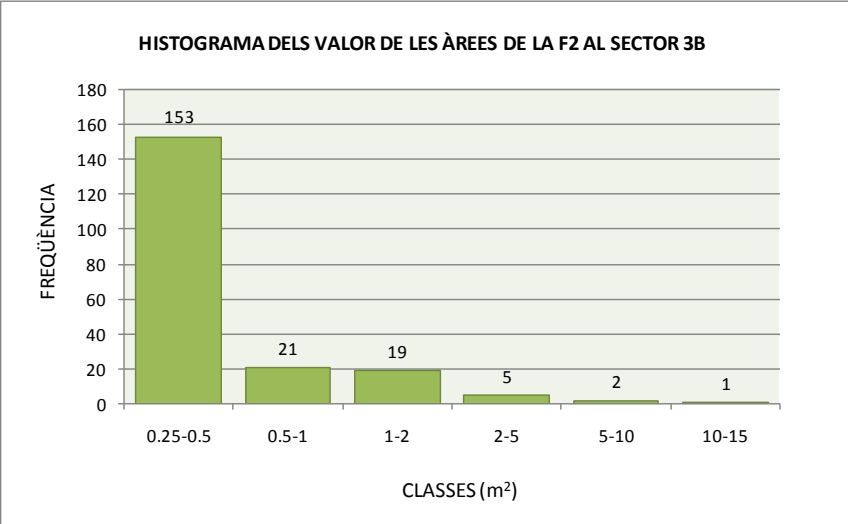
Nº Dades: 1006

DADES SECTOR 3B



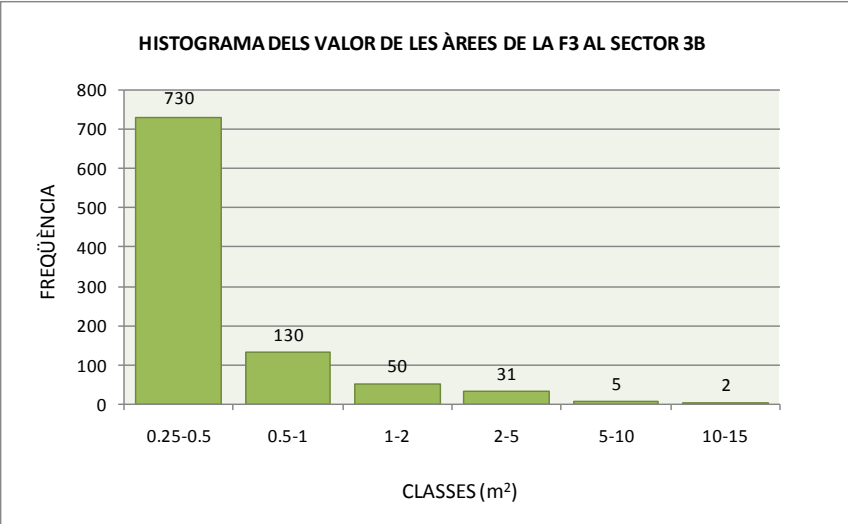
F1 S3B		
ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.67	0.1	11.29

Nº Dades: 283



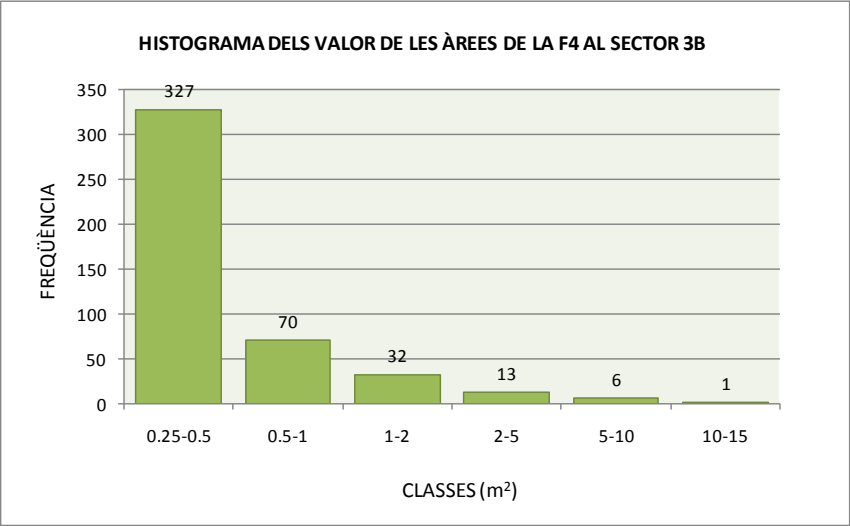
F2 S3B ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.56	0.1	10.75

Nº Dades: 201



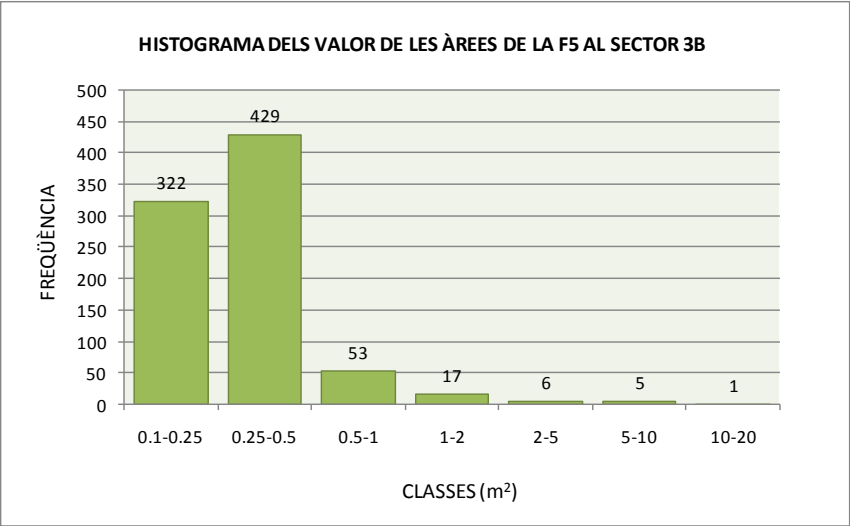
F3 S3B ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.50	0.1	11.59

Nº Dades: 948



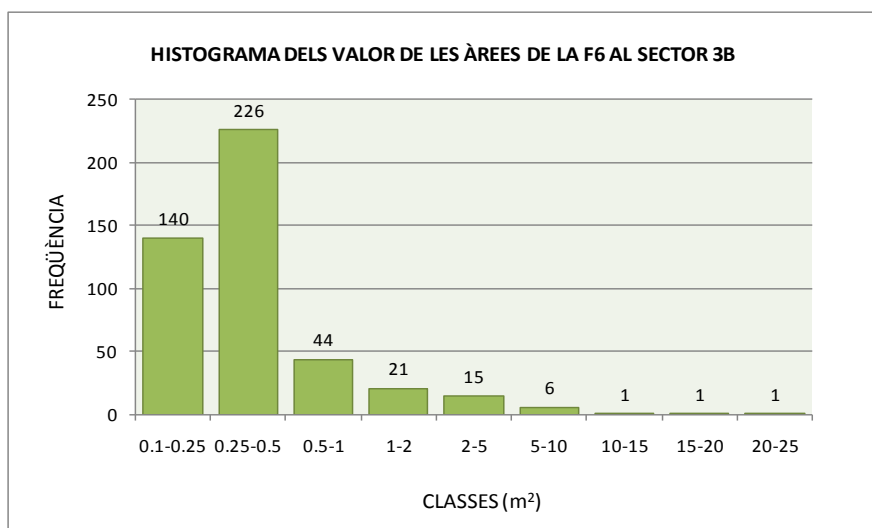
F4 S3B ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.58	0.1	605.78

Nº Dades: 449



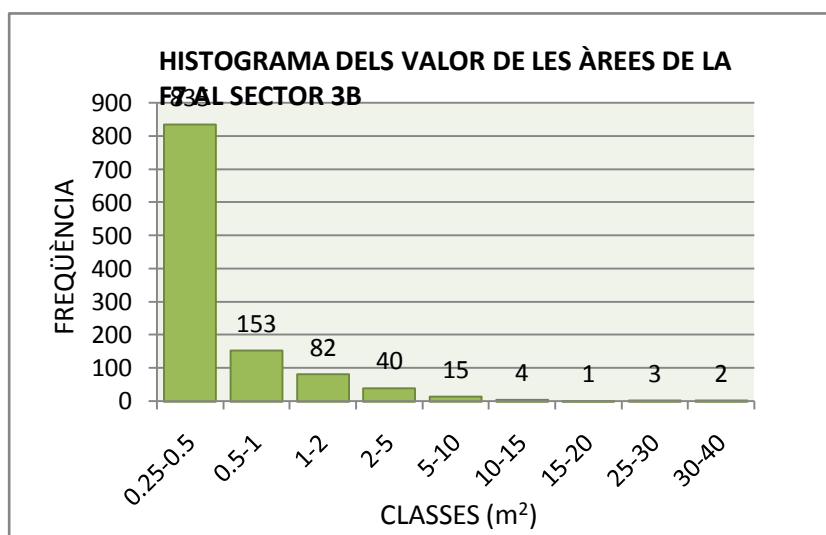
F5S3B ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.42	0.1	16.55

Nº Dades: 511



F6 S3B ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.75	0.1	20.34

Nº Dades: 315

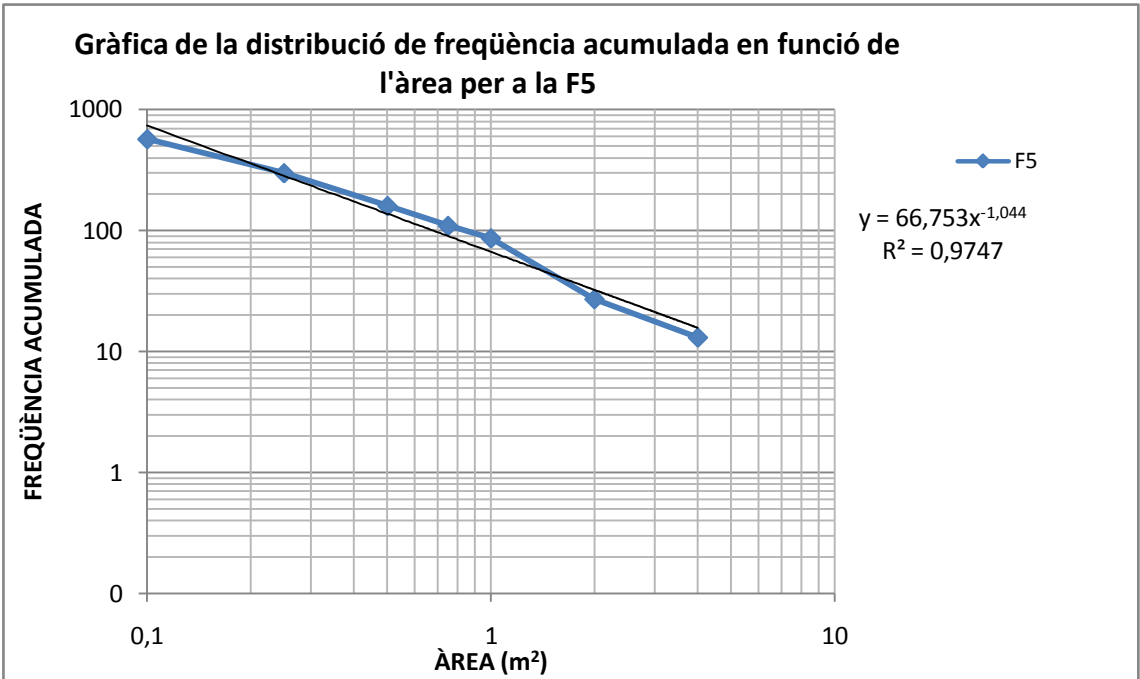
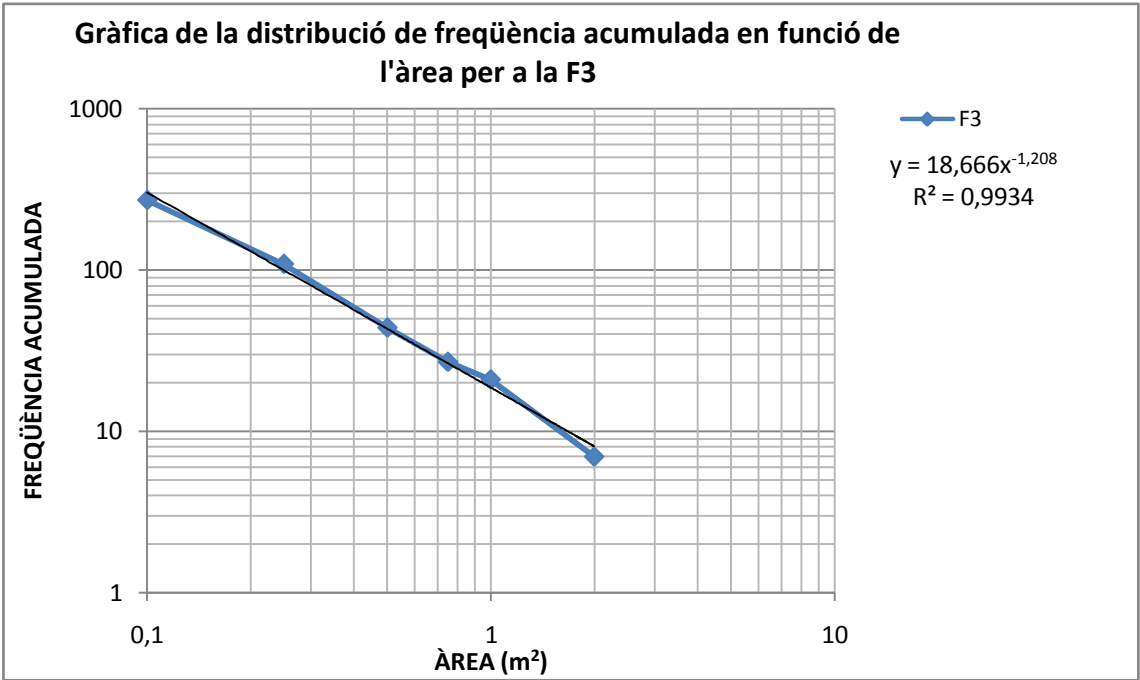


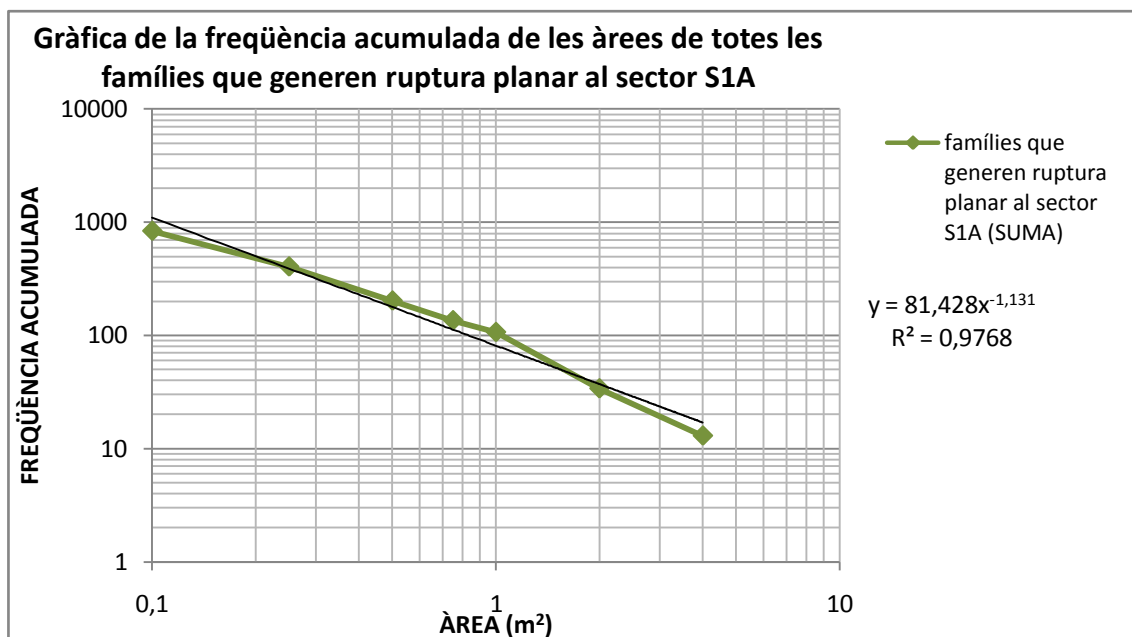
F7 S3B ÀREES (m²)		
MITJA	MIN	MAX
0.83	0.1	39.01

Nº Dades: 972

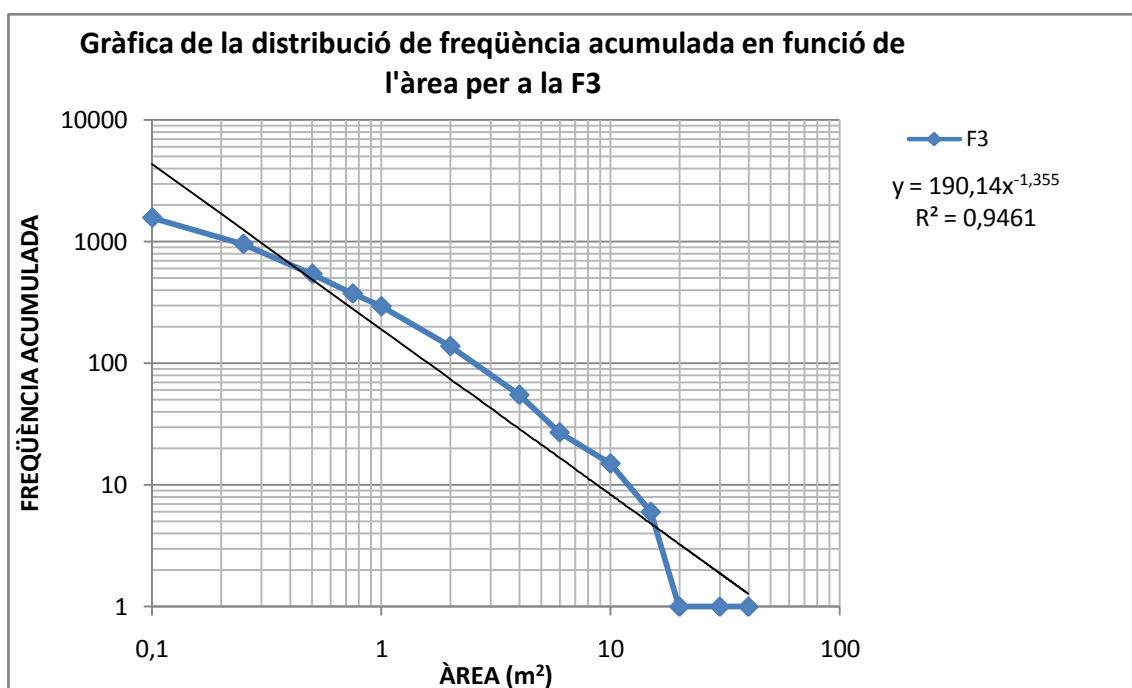
**ANNEX II: DISTRIBUCIÓ ACUMULADA DE LA FREQUÈNCIA DE VALORS DE LES ÀREES PER A
CADA FAMÍLIA QUE PRESENTA RUPTURA PLANAR EN CADA UN DELS SECTORS**

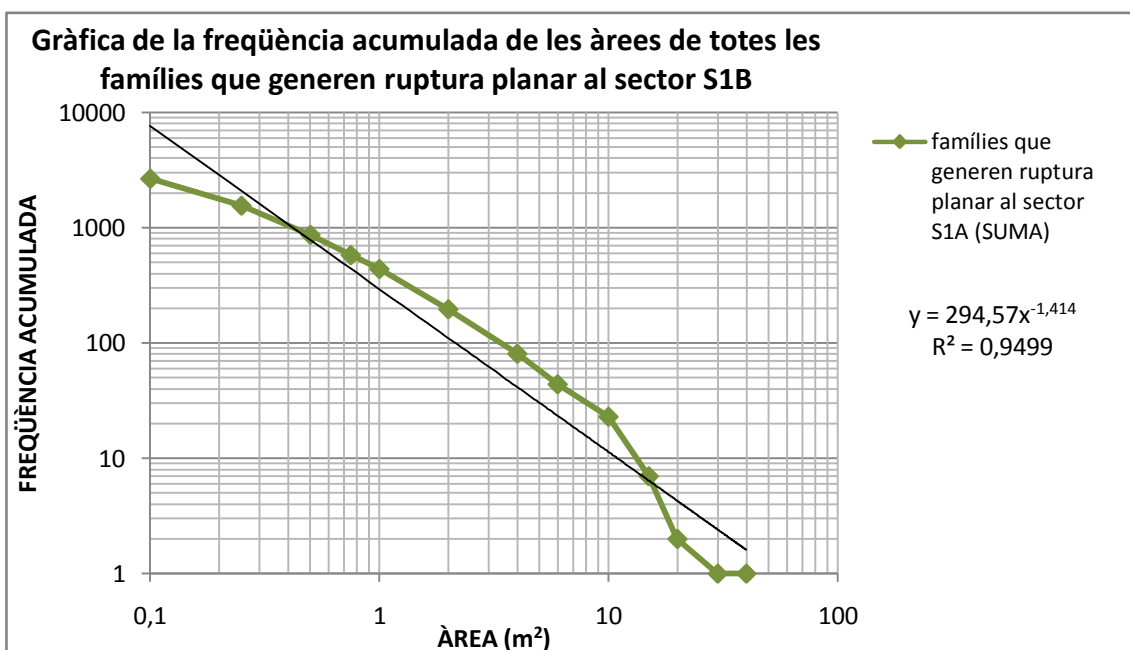
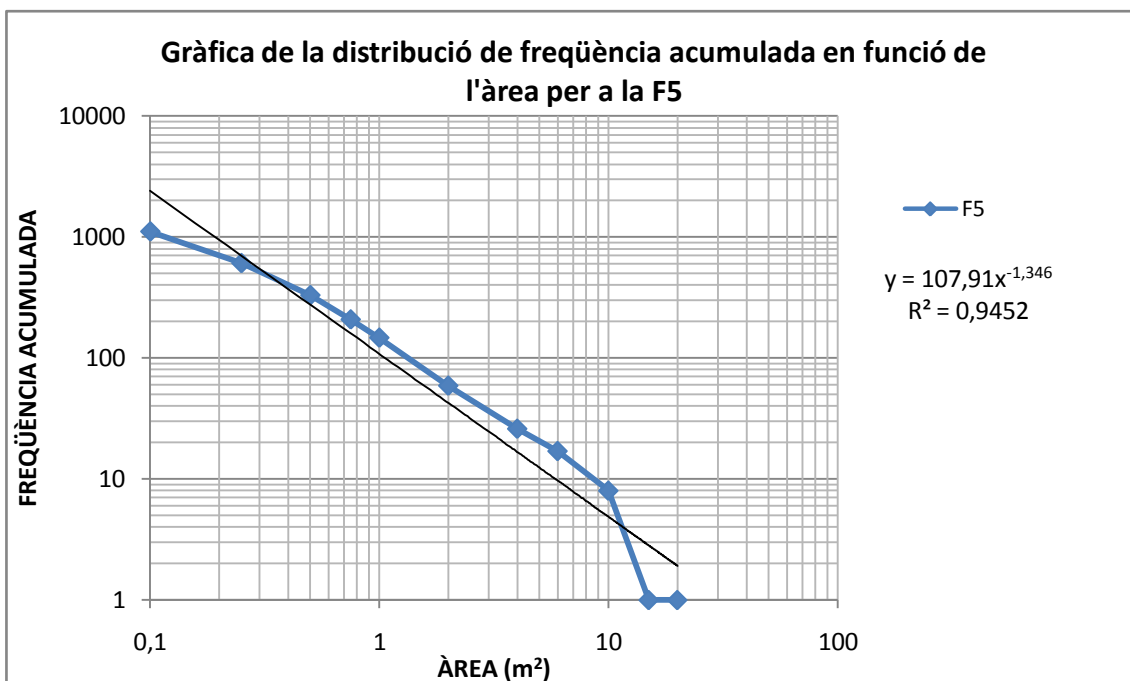
Sector 1A: Les famílies susceptibles de generar inestabilitats per ruptura planar son F3 i F5:



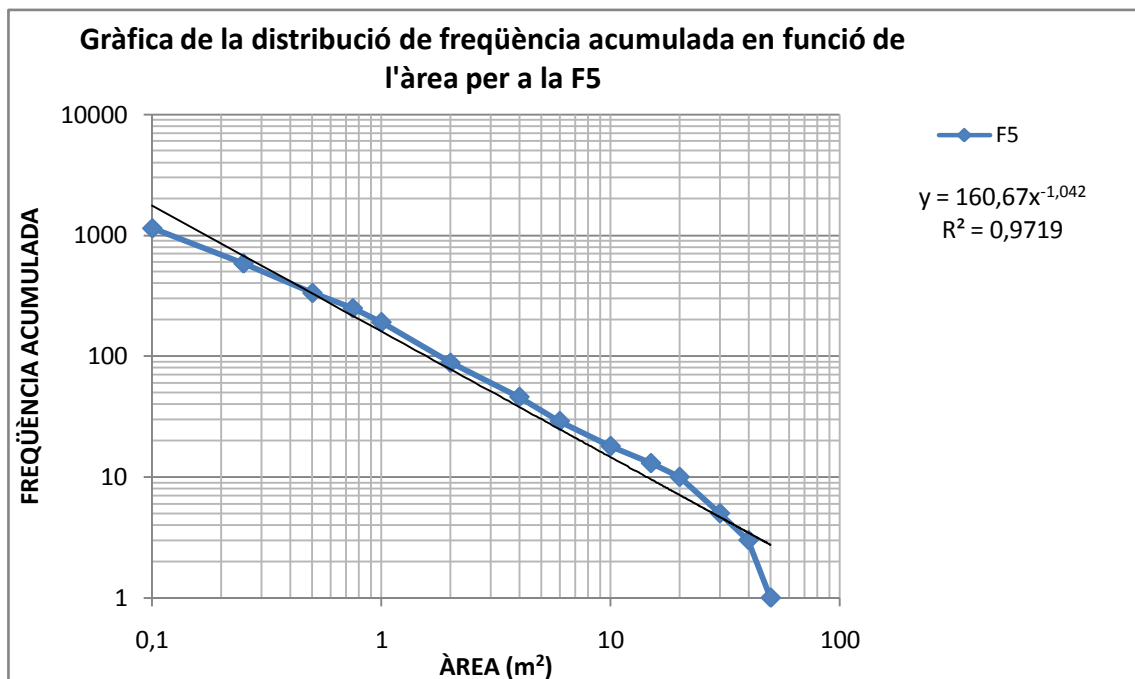
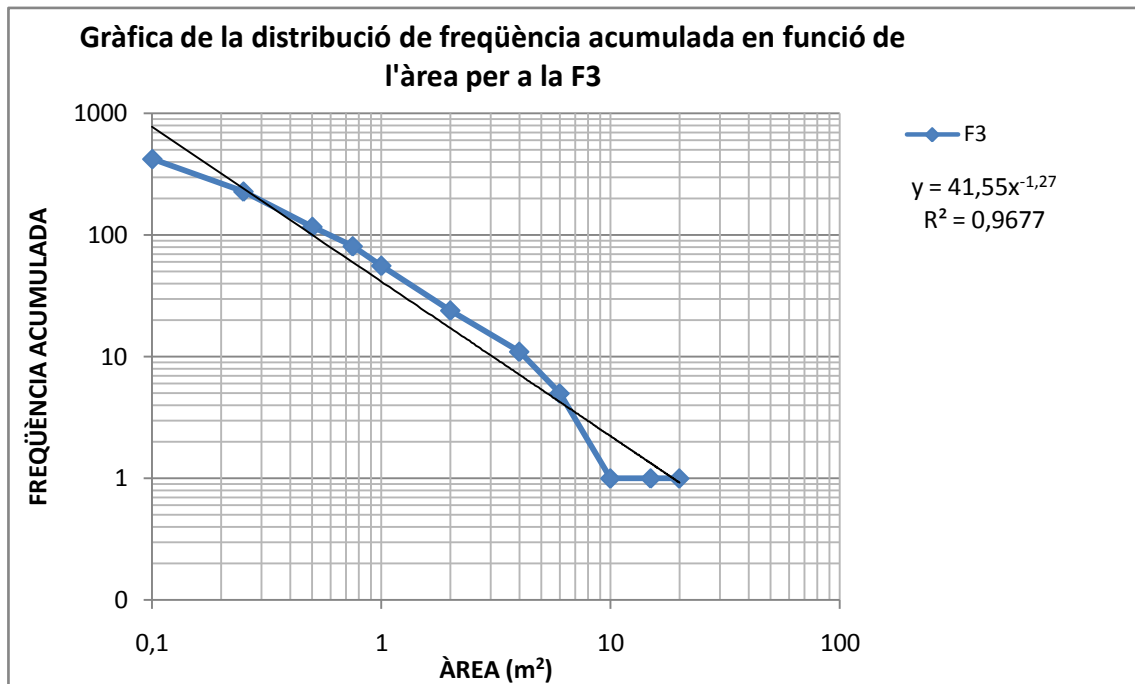


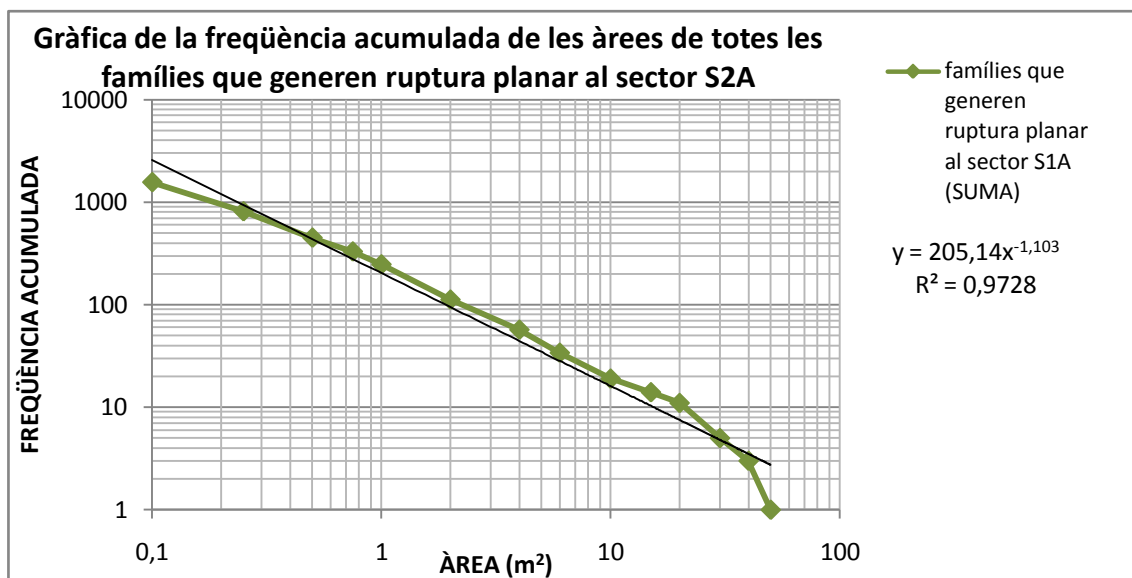
Sector 1B: Les famílies susceptibles de generar inestabilitats amb ruptura planar son F3 i F5



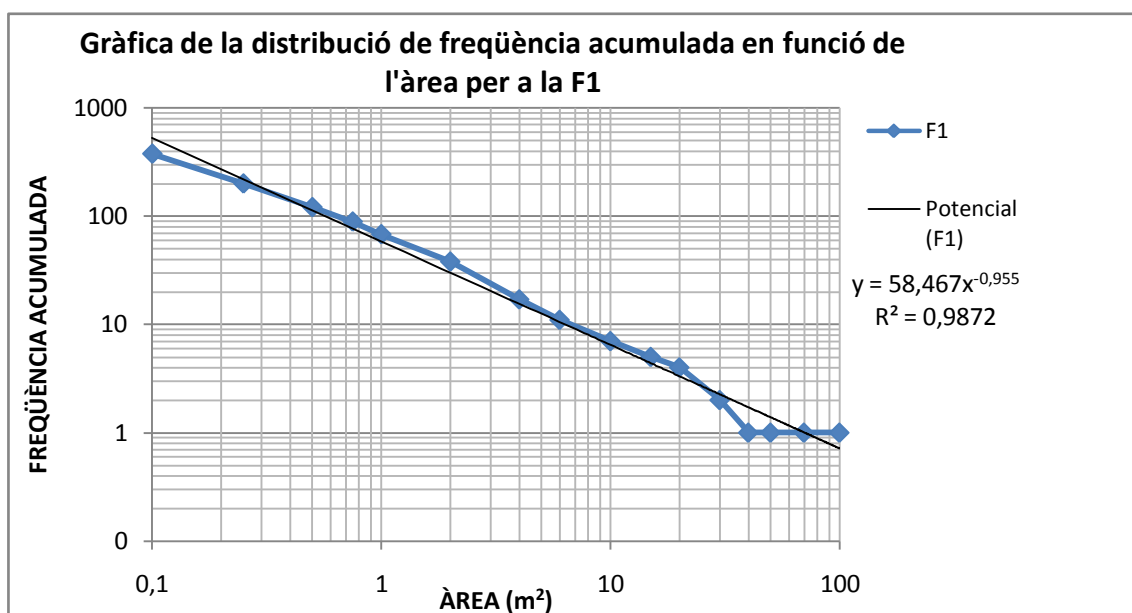


Sector 2A: Les famílies susceptibles de generar inestabilitats amb ruptura planar son F3 i F5.

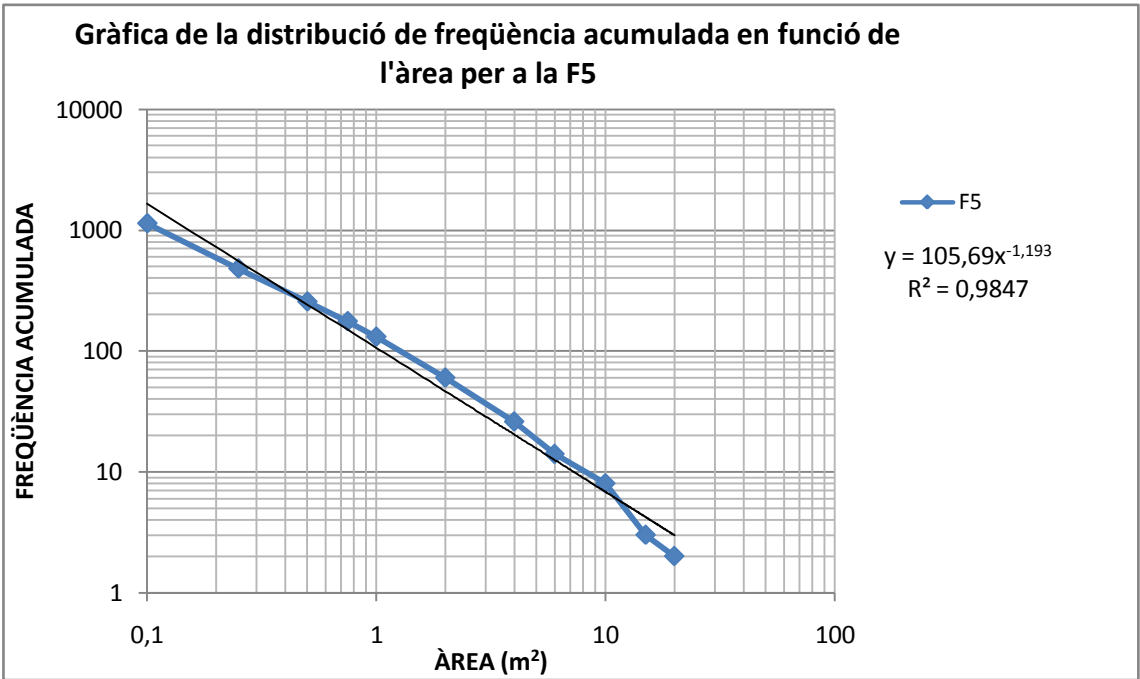
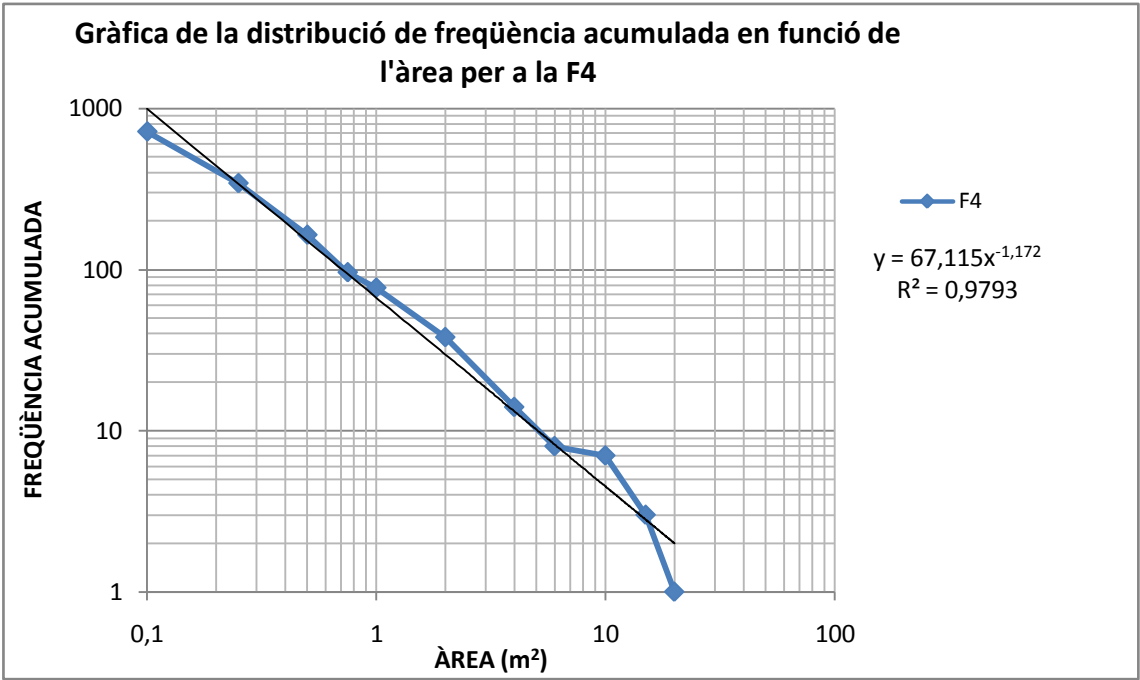


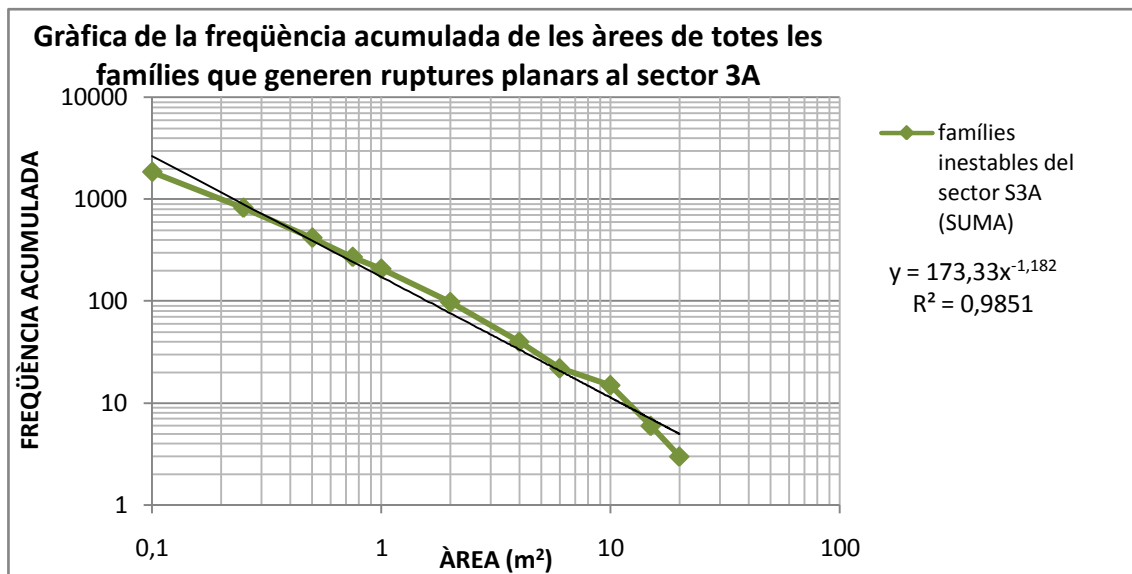


Sector 2B: La família susceptible de generar inestabilitats amb ruptura planar és F1.



Sector 3A: Les famílies susceptibles de generar inestabilitats en ruptura planar son F4 i F5:





Sector 3B: Les famílies susceptibles de generar inestabilitats amb ruptura planar son F3 i F5:

